



**M** 2015

# **GESTÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DO CALÇADO**

**ANDRÉ FILIPE DIAS FIGUEIROA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES


A Dissertação intitulada

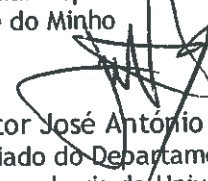
“Gestão de Linhas de Produção na Indústria do Calçado”

foi aprovada em provas realizadas em 19-02-2015

o júri

  
Presidente Professor Doutor Fernando Arménio da Costa Castro e Fontes  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professora Doutora Anabela Carvalho Alves  
Professora Auxiliar Departamento de Produção e Sistemas da Escola de Engenharia  
da Universidade do Minho

  
Professor Doutor José António Soeiro Ferreira  
Professor Associado do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.

  
Autor - André Filipe Dias Figueiroa

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

Ao longo dos últimos anos, a indústria do calçado portuguesa tem vindo a ganhar um lugar de destaque tanto a nível nacional como a nível internacional. Isso deve-se sobretudo à dinâmica e iniciativa do setor e à elevada qualidade que os produtos nacionais têm vindo a alcançar. No entanto, para manter esses padrões é necessário um grande investimento na investigação e desenvolvimento de novos métodos de produção.

O INESC TEC já há bastante tempo que participa em projetos de I&D neste setor. É o caso atual, em que esta dissertação se enquadra, no apoio à gestão de novos e sofisticados equipamentos/linhas de produção. Mas para que estes sejam eficazes e eficientes, também rentabilizando o investimento feito, é necessário estudar a melhor forma de otimizar a sua utilização.

Este documento começa com a revisão do estado da arte acerca de linhas de produção e dos problemas de balanceamento das mesmas. De seguida, é apresentada a nova linha de produção e as suas características. É descrita a abordagem de balanceamento desenvolvida para esta nova linha, interpretada como sendo uma linha de produção de modelos misturados, *unpaced* e síncrona. Esta abordagem comporta duas fases: na primeira é aplicada a heurística *Kilbridge and Wester's Method*, que foi adaptada para o problema concreto, para a obtenção de uma solução inicial; na segunda fase é utilizada a meta-heurística *Iterated Local Search*, por forma a tentar melhorar essa solução inicial.

No final deste documento são apresentados resultados computacionais, incluindo uma comparação com resultados obtidos através de outros métodos, para um determinado conjunto de testes. Dessa comparação pode-se concluir que os resultados obtidos pela conjugação dos dois métodos, *Kilbridge and Wester's Method* e *Iterated Local Search*, apesar de não haver garantia de otimalidade, permitem obter resultados bastante interessantes que podem desde já ser levados em conta.



# Abstract

Over the past few years, the Portuguese footwear industry has achieved a standout place in both national and international markets. This is mainly due to the dynamic and initiative of this industry, and the high quality that national products have been achieved. However, to keep these standards, a large investment in research and development of new production methods is required. For a long time INESC TEC is participating in R&D projects in this sector. It is the current case, in which this dissertation may be integrated, in order to support the management of new and sophisticated equipment/production lines. Nevertheless, to make the line the most effective and efficient as possible, and also maximizing the investment made, it is necessary to study the best way to optimize it.

This paper begins with a review of the state of the art about production lines and the assembly line balancing problems. Then it is presented the new production line and its features. It is described an approach in order to balance this new line, which is interpreted as a mixed model line, unpaced synchronous. This approach consists of two phases: in the first one, it is applied the heuristic Kilbridge and Wester's Method, which has been adapted to this particular problem, to obtain an initial solution; in the second stage, it is used the meta-heuristic Iterated Local Search, in order to improve that initial solution.

At the end of this document, computational results are presented, including a comparison with results obtained by other methods, for a given set of tests. From this comparison it can be concluded that the results obtained by the combination of the two methods, Kilbridge and Wester's and Iterated Local Search, although an optimal solution is not guaranteed, present interesting results which can already be taken into consideration.



# Agradecimentos

Ao meu orientador, o professor doutor José Soeiro Ferreira, por todo o empenho e ajuda prestada ao longo deste trabalho. Obrigado por todos os conselhos e opiniões dadas que foram sem dúvida muito importantes neste projeto.

A special thanks to Parisa Sadeghi for all the help and availability during the development of this work.

Aos meus amigos por toda a paciência e apoio prestado, não só durante este projeto, mas por estarem lá desde sempre.

À minha irmã, aos meus avós, e em especial aos meus pais, que é muito graças ao esforço deles que me é possível estar onde estou hoje.

André Filipe Dias Figueiroa





*“Whether you think you can, or you think you can’t  
– you’re right.”*

Henry Ford



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.2	Motivação . . . . .	2
1.3	Estrutura documental . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Linhas de Produção . . . . .	5
2.1.1	Características da linha e dos postos de trabalho . . . . .	6
2.1.2	Postos de Trabalho . . . . .	8
2.1.3	Gama operatória . . . . .	8
2.2	Problemas relacionados com as linhas de produção . . . . .	8
2.3	Balanceamento . . . . .	9
2.3.1	SALBP . . . . .	9
2.3.2	Classificação dos problemas de balanceamento . . . . .	10
2.4	Métodos de resolução . . . . .	12
2.4.1	Métodos heurísticos . . . . .	13
2.4.2	Meta-heurísticas . . . . .	14
2.4.3	Vizinhança . . . . .	16
2.5	Aplicação de heurísticas de balanceamento . . . . .	16
2.6	Resumo . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Caso em estudo</b>	<b>19</b>
3.1	Nova linha de produção . . . . .	19
3.2	Características . . . . .	21
3.3	Método de balanceamento . . . . .	21
3.4	Objetivos . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Abordagem e método de resolução</b>	<b>23</b>
4.1	Linha do tipo <i>unpaced</i> síncrona . . . . .	23
4.2	Gama operatória do calçado . . . . .	24
4.3	Dados do problema . . . . .	25
4.4	Organização dos dados . . . . .	26
4.5	Adaptação da heurística KWM . . . . .	26
4.6	Aplicação da heurística KWM adaptada . . . . .	29
4.7	Aplicação da meta-heurística ILS e obtenção da solução final . . . . .	31
4.8	Resumo . . . . .	33

<b>5</b>	<b>Discussão de resultados</b>	<b>35</b>
5.1	Exemplo simples . . . . .	35
5.1.1	Dados utilizados . . . . .	36
5.1.2	Heurística KWM adaptada e ILS . . . . .	37
5.1.3	Capacidade da caixa . . . . .	38
5.2	Resultados computacionais . . . . .	40
5.2.1	Conjunto 1 . . . . .	41
5.2.2	Conjunto 2 . . . . .	42
5.2.3	Conjunto 3 . . . . .	44
5.2.4	Conjunto 4 . . . . .	45
5.2.5	Conjunto 5 . . . . .	46
5.2.6	Resumo dos testes . . . . .	49
5.3	Comparação de resultados . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>53</b>
6.1	Satisfação dos objetivos . . . . .	53
6.2	Trabalho futuro . . . . .	54
	<b>Referências</b>	<b>57</b>

# Lista de Figuras

2.1	Linha de produção de modelo único . . . . .	5
2.2	Linha de produção multi-modelo . . . . .	6
2.3	Linha de produção misturada . . . . .	6
2.4	Principais métodos de otimização . . . . .	13
3.1	Layout da nova linha . . . . .	20
3.2	Design de posto de trabalho . . . . .	20
4.1	Processo para obter solução final . . . . .	23
4.2	Exemplo de grafo de precedência para a construção de um par de sapato . . . . .	25
4.3	Processo de adaptação do plano de produção . . . . .	28
4.4	Aplicação da heurística KWM adaptada . . . . .	31
4.5	Aplicação da meta-heurística ILS . . . . .	33
5.1	Resultado após aplicação da heurística KWM adaptada . . . . .	37
5.2	Resultado após aplicação da meta-heurística ILS . . . . .	38
5.3	Resultado após aplicação da heurística KWM em caixas com capacidade de 5 pares . . . . .	39
5.4	Resultado após aplicação da meta-heurística ILS em caixas com capacidade de 5 pares . . . . .	39



# Lista de Tabelas

2.1	Versões do SALBP . . . . .	10
4.1	Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de produção . . . . .	24
5.1	Código e sequência das tarefas a executar para cada modelo . . . . .	36
5.2	Duração das tarefas a executar para cada modelo . . . . .	36
5.3	Necessidades mínimas para a execução das tarefas . . . . .	36
5.4	Constituição dos postos de trabalho . . . . .	36
5.5	Plano de produção . . . . .	37
5.6	Teste1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS . . . . .	41
5.7	Teste1 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas . . . . .	42
5.8	Teste1 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores . . . . .	42
5.9	Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS . . . . .	43
5.10	Teste2 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas . . . . .	43
5.11	Teste2 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores . . . . .	43
5.12	Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS . . . . .	44
5.13	Teste3 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas . . . . .	44
5.14	Teste3 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores . . . . .	45
5.15	Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS . . . . .	45
5.16	Teste4 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas . . . . .	46
5.17	Teste4 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores . . . . .	46
5.18	Teste1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores	47
5.19	Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores	47
5.20	Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores	48
5.21	Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores	48
5.22	Teste1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina . . . . .	48
5.23	Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina . . . . .	49
5.24	Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina . . . . .	49
5.25	Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina . . . . .	49
5.26	Comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos . . . . .	50





# Abreviaturas e Símbolos

INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto - Tecnologia e Ciência
ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
GALBP	<i>Generalized Assembly Line Balancing Problem</i>
KWM	<i>Kilbridge and Wester's Method</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
RPW	<i>Ranked Positional Weights Method</i>



# Capítulo 1

## Introdução

A indústria do calçado em Portugal é uma das que mais prestígio tem, tanto a nível nacional como internacional. Sendo este um mercado altamente competitivo, é necessário estar sempre a par das novas tendências, de forma a acompanhar as necessidades dos consumidores, que cada vez mais são mais variadas. Para tal, é preciso usar novas técnicas e equipamentos que possibilitem acompanhar essas novas e crescentes necessidades, e que por outro lado tornem mais fácil a adaptação das linhas existentes ao desenvolvimento de novos produtos, como por exemplo nas mudanças de estação onde são lançadas novas coleções, sem nunca afetar a qualidade destes.

De forma a tentar colmatar estas necessidades, uma equipa do INESC TEC está neste momento a colaborar na conceção, desenvolvimento e gestão de uma linha de produção específica para esta área industrial, tendo como principal objetivo criar uma linha de produção capaz de suportar a produção de vários modelos de sapatos em simultâneo. Esta linha de produção vai ser composta por postos de trabalho todos eles ligados através de um corredor central por onde é feito o transporte das caixas em produção. Para além disso, em cada um desses postos de trabalho existem *buffers* onde, caso o posto esteja a trabalhar numa caixa, a seguinte fica em espera. Essa característica permitiu abdicar do sistema tradicional onde as caixas após cada visita a um posto de trabalho seguiam para um armazém.

Considerando a linha de produção mencionada, o presente documento descreve a abordagem desenvolvida para lidar com um problema de balanceamento. Em linhas gerais, balancear uma linha consiste em afetar múltiplas tarefas a um número de postos de trabalho de uma forma equilibrada, ou seja, de forma que os postos fiquem com uma carga de trabalho próxima entre eles reduzindo assim os tempos mortos. Nesta abordagem vai ser feito o balanceamento de tarefas para uma linha de produção de calçado misturado, do tipo *unpaced* síncrona. A abordagem começa com a utilização da heurística *Kilbridge and Wester's Method* para se obter uma primeira solução. De seguida, sobre essa solução, é aplicada a meta-heurística *Iterated Local Search* por forma a tentar melhorar a solução encontrada. Visto que não foram encontrados outros estudos nesta área em específico, todos estes métodos tiveram de sofrer adaptações para que no final fosse

também exequível fazer a implementação dos mesmos, e ser possível realizar diversos testes para se obterem os resultados pretendidos. Essas adaptações vão ser descritas ao longo do presente documento, mais especificamente no capítulo 4. Por fim é feita uma análise dos resultados obtidos e feita uma comparação com os já obtidos pela equipa do INESC TEC.

De referir também que estes resultados são obtidos a partir de simulação computacional, sendo que o simulador foi desenvolvido, para o caso em questão com os métodos já referidos, em linguagem C++.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste projeto prende-se então com o estudo desta nova linha, explorando as suas capacidades em termos de produção, contribuindo para tal com métodos de otimização para fazer um bom balanceamento das operações para variados operadores e estações de trabalho. Evidentemente que outras competências como a percepção de como são tratados estes problemas no mundo real, ou a programação de algoritmos deste género, são também um alvo importante na realização deste projeto.

Para além disso, com os resultados obtidos no final vai ser possível fazer uma comparação com os resultados dos métodos já desenvolvidos pela equipa do INESC TEC, e a partir daí tirar possíveis conclusões sobre quais dos métodos será mais proveitoso de se implementar na linha real.

## 1.2 Motivação

Atualmente, como se sabe, existe uma grande competitividade entre empresas do mesmo sector, mas devido à conjuntura económica que temos vivido nos últimos anos, as empresas são forçadas a serem mais competitivas com menos meios. Por isso é necessário que sejam cada vez mais aproveitados os recursos existentes nas empresas. É neste sentido que o balanceamento das linhas de produção ganha uma grande importância nos dias de hoje, pois um bom balanceamento vai permitir às empresas obterem maiores níveis de produtividade sem ter que adquirir mais equipamentos ou contratar novos empregados.

Para além disto, o próprio tema do balanceamento e gestão de operações é motivador por si só, pois é bastante abrangente e complexo, e pode ser aplicado também noutras indústrias, para além da indústria do calçado abordada neste trabalho.

## 1.3 Estrutura documental

Este documento é o resultado da Dissertação "Gestão de Linhas de Produção na Indústria do Calçado". Visto este projeto ser algo longo e complexo, a sua descrição é feita de forma faseada ao longo deste documento para maior facilidade de leitura por parte do leitor.

Sendo assim, neste primeiro capítulo é feita uma introdução à indústria do calçado, bem como os objetivos que se pretendem alcançar com este trabalho e as motivações que levaram à realização

do mesmo.

No capítulo 2 é feita uma caracterização de linhas de produção, desde os seus modos de funcionamento até ao tipo de informação que necessitam para iniciarem os processos dos pedidos. É feito também o estudo acerca dos problemas de balanceamento de linhas de produção.

No capítulo 3 é representado o problema em causa, onde se aborda a nova linha e as suas características, os métodos que vão ser abordados para a solução do problema e quais são os objetivos pretendidos para o balanceamento da mesma.

No capítulo 4 é mostrada toda a abordagem ao problema, e como todo o estudo resultante da revisão bibliográfica foi adaptado a este caso.

No quinto capítulo é feita a discussão dos resultados obtidos através dos testes aos métodos aplicados, bem como feita a comparação com os resultados já obtidos pela equipa do INESC TEC.

Por fim, no capítulo 6 são deixadas as conclusões e ideias para trabalho futuro.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica concisa acerca do estudo do balanceamento das linhas de produção. Sendo assim esta revisão vai ser dividida em duas partes essenciais:

- Descrição geral acerca de linhas de produção, que vão ser descritas na secção [2.1](#)
- Problemas de balanceamento de linhas de produção e possíveis métodos de resolução, tema abordado na secção [2.3](#)

É por isso de grande importância compreender estes conceitos mais básicos, para se compreender melhor o trabalho desenvolvido na Dissertação.

### 2.1 Linhas de Produção

Designa-se por linha de produção um conjunto de postos de trabalho ( [2.1.2](#)) dispostos pela sequência de operações, por onde os produtos a produzir vão circular. Os produtos a produzir vão visitando os postos de trabalho sucessivamente enquanto são movidas pela linha. Essas movimentações tem geralmente a ajuda de alguns mecanismos de transporte, como por exemplo tapetes rolantes [\[1\]](#).

Segundo Becker e Scholl [\[2\]](#) , podemos caracterizar a linha consoante o número de modelos que forem produzidos da seguinte forma:

#### Linha de produção de modelo único

Se a linha é projetada para produzir um tipo de modelo.



Figura 2.1: Linha de produção de modelo único



### Linha de produção multi-modelo

Se a linha estiver preparada para produzir vários modelos, mas enquanto está a produzir apenas um modelo circula na linha.



Figura 2.2: Linha de produção multi-modelo

### Linha produção misturada

Se a linha for capaz de produzir diferentes modelos simultaneamente.



Figura 2.3: Linha de produção misturada

No caso específico da indústria do calçado, esta está usualmente organizada em secções funcionais, sendo elas corte, costura e montagem. Na linha de montagem em estudo, estas três secções funcionais vão estar fisicamente separadas, tendo cada uma delas uma linha de produção própria. Tendo isso em consideração, é possível perceber que será da maior importância que o fluxo produtivo das linhas esteja o mais sincronizado possível. Neste projeto de dissertação vai ser tratada a fase de costura, que tem vindo a ser considerada como a mais complicada por vários autores [3]. É interessante também analisar que para os diferentes tipos de linha, sejam eles de modelo único, multi-modelo ou misturado, esse balanceamento vai ser feito de diferente forma. No caso da linha ser capaz de produzir apenas um modelo, este balanceamento é feito apenas uma vez e vai manter-se durante toda a produção desse modelo. Se a linha for de produção de multi-modelos, o balanceamento das operações vai ter de ser adaptado às exigências a cada novo modelo, ou seja, no fim da produção de cada modelo vai ter de ser feito um novo balanceamento consoante a gama operatória (2.1.3) do modelo que vai entrar em produção. Nas linhas misturadas vão estar a ser produzidos em simultâneo vários modelos, por isso estas devem estar preparadas para que todos os modelos possam ser feitos sem ter de ser feitas grandes alterações na linha.

#### 2.1.1 Características da linha e dos postos de trabalho

Boysen, Fliedner e Scholl [4], referiram quais as características das linhas e dos postos a ter em consideração para problemas de balanceamento, tendo-as classificado por seis atributos:

**Movimento das peças em produção**

Neste tipo de classificação existem dois tipos de linha:

- *Paced*
- *Unpaced*

Nas linhas do tipo *paced* o tempo de ciclo restringe o tempo de funcionamento do posto de trabalho. Esta limitação prende-se quando a produção é de um único modelo, no caso de serem produções misturadas este tempo de ciclo tem de ser respeitado na média de trabalho. Pode em alguns casos essa restrição do tempo de ciclo ter de ser respeitada consoante uma dada probabilidade ou proporção. Quanto ao tempo de ciclo, existe a possibilidade de todas as estações estarem sujeitas a um tempo de ciclo único, bem como pode acontecer o caso de existirem divergências de tempo de ciclo de umas estações de trabalho para outras.

Já as linhas *unpaced* não estão restringidas por um tempo de ciclo. Neste caso há avanços quando o posto termina a sua tarefa. Neste tipo ainda existe a subdivisão em síncrona ou assíncrona. Numa linha *unpaced* síncrona, o trabalho só avança quando em todos os postos de trabalho estão acabadas as tarefas atribuídas, numa linha *unpaced* assíncrona o trabalho avança mal o posto termina a tarefa que está a executar. Este trabalho segue para a estação de trabalho seguinte ou para um *buffer*.

**Layout da linha**

Classificação atribuída pela disposição física dos postos de trabalho da linha. Esta pode ser feita em série ou em U. Neste último caso pode ser constituído por uma única linha em U, ou por diversos segmentos dispostos em U;

**Linhas paralelas**

Entende-se por paralelização quando existe mais do que uma linha para balancear ou quando o número de linhas a instalar é também por si só um problema de decisão. Quando há paralelização de estações de trabalho a sua capacidade é duplicada e podem realizar as tarefas a si atribuídas de forma alternada;

**Atribuição de recursos**

Para a execução das tarefas nos postos de trabalho, estes precisam de estar equipados tanto com operadores e/ou equipamento de forma a poderem cumprir com as suas tarefas corretamente.

**Incremento no tempo de operações dependentes da sequência**

Parte do tempo das estações de trabalho é ocupado com atividades não produtivas, tais como transporte das peças a produzir, deslocações do próprio trabalhador. Em alguns casos, estes incrementos não são considerados;

**Aspetos adicionais**

Em certos casos o sistema de produção pode requerer requisitos adicionais, tais como:

- *Buffers*/armazenamentos intermédios, sendo que estes devem estar corretamente alocados e dimensionados;
- Linhas de alimentação, cujo fluxo de produção ao entrar na linha principal tem de estar coordenado com a distribuição das tarefas pelos postos, bem como com o tempo de ciclo;
- Caixas que contenham material necessário;
- Certas tarefas podem exigir que o material em produção seja colocado de determinada maneira, para que a tarefa seja bem executada.

### 2.1.2 Postos de Trabalho

Posto de trabalho de uma linha de produção é onde são executadas operações descritas nas gamas operatórias ( 2.1.3) . Estes postos podem ser compostos por uma ou várias máquinas, um ou mais operador, ou pela combinação de um operador e uma ou várias máquinas.

Usualmente, os diferentes postos de trabalhos estão ligados por tapetes rolantes que asseguram o transporte de um posto de trabalho para outro.

Ao longo deste documento, os postos de trabalho vão também ser referenciados como estações de trabalho.

### 2.1.3 Gama operatória

É nas gamas operatórias que são descritas as operações necessárias para a produção de um determinado produto, desde o seu início até este estar completamente pronto, bem como o tempo de processamento preciso em cada uma dessas operações. Nas gamas operatórias são também mostradas as relações de precedência entre tarefas, ou seja, uma dada operação só poderá ser executada se as suas precedentes já tiverem sido feitas.

Estas precedências são usualmente descritas de forma visual através de grafos. Através dos grafos de precedência obtidos, vai ser possível organizar as operações semelhantes de modelos diferentes de forma a tornar o balanceamento mais fácil de realizar.

## 2.2 Problemas relacionados com as linhas de produção

Visto que a eficiência das linhas de produção tem cada vez mais impacto no desempenho das próprias empresas, o seu estudo tem vindo a ser cada vez mais aprofundado. De entre os temas mais abordados destacam-se o balanceamento e sequenciamento. O balanceamento trata de afetar as tarefas aos diversos postos de trabalho da linha, por sua vez, o sequenciamento determina qual a sequência de produção a seguir. Apesar de estes dois temas estarem bastante relacionados, são tratados usualmente de forma separada ou sequencial. [5]

Neste projeto apenas vai ser abordado o tema do balanceamento, onde as suas bases são descritas na secção seguinte ( 2.3).

## 2.3 Balanceamento

O balanceamento de uma linha de produção consiste em atribuir as diversas tarefas que vão ter de ser executadas a postos de trabalho, usualmente apelidado pelos autores de *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP). Este balanceamento tem de ser exequível e tentar ser o mais uniforme possível, ou seja, que as tarefas estejam bem distribuídas pelas postos.

Visto este tipo de problemas apresentarem grande complexidade, foi desenvolvido um modelo simplificado, o modelo *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP 2.3.1). Este modelo, apesar de não corresponder em termos de complexidade à realidade, é um bom ponto de partida para iniciar o estudo dos problemas de balanceamento.

Foram feitos estudos para outros modelos de linhas de produção, como o modelo em U ou linhas paralelas, sendo estes denominados por *Generalized Assembly Line Balancing Problem* (GALBP). [2]

### 2.3.1 SALBP

Os problemas de balanceamento de linhas de produção por norma tendem a ser bastante complexos. Tendo isso em conta, foi criado um modelo simplificado para este tipo de problemas, o SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*). Como já foi referido, apesar de este modelo ser bastante mais simples do que o que acontece na maioria dos casos reais, este permitiu fazer o estudo dos principais problemas, sendo que os problemas gerais são extensões deste.

Segundo Becker e Scholl [6] este modelo assenta nas seguintes premissas:

- Produção em massa de um único produto;
- Todo o processo de produção é conhecido;
- Linha do tipo *paced* com um tempo de ciclo;
- Tempos de operação determinísticos;
- Não existem restrições para atribuir tarefas a postos, para além das restrições de precedências;
- Linha de produção em série com  $m$  postos de trabalho;
- Todos os  $m$  postos de trabalho da linha estão igualmente equipados, tanto a nível de máquinas como de operadores;
- Eficiência ( $E$ ) da linha é maximizada pelo tempo total das tarefas  $T_{total}$ :  $E = T_{total} / (c \cdot m)$ .

Sendo assim podemos dizer que no SALBP a produção é orientada para a produção em massa de um único produto, onde todo o processo é bem conhecido, bem como as restrições. Existe uma linha de produção com  $m$  estações em série, todos equipados da mesma forma, sendo que existe

um tempo de ciclo fixo bem conhecido, tempo esse que limita o tempo de produção de cada tarefa nos postos de trabalho.

Para além disso o SALBP pode ser caracterizado tendo em conta o objetivo que se pretende atingir [2]. Essas variantes podem ser vistas na tabela 2.1

		Tempo de ciclo	
		Atribuído	Minimizar
Nº de Postos	Atribuído	SALBP-F	SALBP-2
	Minimizar	SALBP-1	SALBP-E

Tabela 2.1: Versões do SALBP

Da tabela podemos então verificar as seguintes variações:

#### **SALBP-1**

Para um dado tempo de ciclo, pretende-se minimizar o número de postos de trabalho.

#### **SALBP-2**

Para um determinado número de postos de trabalho, minimizar o tempo de ciclo.

#### **SALBP-E**

Tenta encontrar uma solução admissível minimizando tanto o número de postos de trabalho bem como o tempo de ciclo.

#### **SALBP-F**

Tenta encontrar uma solução admissível para um problema onde é conhecido o tempo de ciclo e o número de postos de trabalho disponíveis.

Como já foi referido, o SALBP é uma grande ajuda no estudo de vários destes problemas, contudo tem algumas diferenças quando comparado com a realidade. Essas principais diferenças, que acabam por ser simplificações, prendem-se com o facto de todos os postos de trabalho estarem equipados igualmente, bem como o facto de as restrições do mundo real não se prenderem apenas às restrições de precedência.

### **2.3.2 Classificação dos problemas de balanceamento**

De forma a facilitar o estudo dos ALBP, Boysen, Fliedner e Scholl [4] construíram um esquema de classificação deste tipo de problemas. Para os autores, existem três fatores a ter em conta:

- Características dos grafos de precedência 2.3.2.1;
- Características da linha e dos postos de trabalho (já apresentadas em 2.1.1);
- Objetivos 2.3.2.2.

### 2.3.2.1 Características dos grafos de precedência

Um grafo de precedências consiste num conjunto de nós, que representam tarefas a serem executadas, ligados por arcos que se referem às relações de precedência entre os nós que ligam. Estes nós e pesos de arcos podem conter outras informações importantes, tais como o tempo de execução da tarefa, ou alternativas de processamento. Segundo o mesmo artigo [4] as características dos grafos de precedência são representados por seis atributos:

#### Grafo de precedências específico do produto

Tem em conta se é para produzir um modelo único ou vários modelos. Independentemente do número de modelos a produzir, o mais importante para os problemas de balanceamento é o grau de homogeneidade dos grafos de precedência dos modelos a produzir;

#### Estrutura do grafo de precedência

Em alguns casos é possível restringir o grafo de precedências para algumas estruturas especiais, de forma a se conseguirem criar algoritmos mais eficientes;

#### Tempo de processamento

O tempo de processamento das tarefas pode variar bastante, seja por se tratar de uma tarefa manual mais complexa ou por se detetar algum problema na maquinaria. Para tal, neste tipo de problemas são considerados três tipos de tempo:

- Tempos de processamento considerados estáticos e determinísticos;
- Estocásticos, caso sejam desconhecidos (ou parcialmente conhecidos);
- Dinâmico, quando existem variações nos tempos de processamento, por exemplo devido ao tempo de aprendizagem de uma nova tarefa por parte dos operadores da linha.

#### Incremento no tempo de operações dependentes da sequência

Estes incrementos ocorrem quando a sequência das operações afeta o tempo de processamento;

#### Restrições de atribuição

Para além das relações de precedência, as restrições de atribuição podem afetar a atribuição das operações aos postos (podem forçar ou proibir certas combinações);

#### Alternativas no processo

Caso existam alternativas de produção, tanto o processo produtivo como o grafo de precedências vão sofrer alterações. Estas alterações vão provocar um problema de decisão adicional.

### 2.3.2.2 Objetivos do balanceamento

O balanceamento de uma linha de produção envolve um conjunto de operações a cumprir, de forma a se atingir um ou vários objetivos.

Usualmente os objetivos pretendidos são:

- Minimizar os custos/perdas da linha e maximizar o seu lucro;
- Minimizar o número de postos de trabalho, sem por em causa a produção planeada;
- Minimizar o tempo de ciclo, para um determinado número de postos de trabalho;
- Maximizar a eficiência da linha, ou seja, todos os postos de trabalho devem estar a ser aproveitados da forma mais igual possível;
- Minimizar a discrepância dos tempos de utilização dos diversos postos, ou seja, fazer com que todos tenham uma taxa de ocupação semelhante.

Há que ter em atenção que, seja qual for o objetivo do balanceamento, a solução encontrada tem de ser exequível na linha em causa. Obviamente que a consideração de mais do que um objetivo simultaneamente dificulta seriamente o problema.

## 2.4 Métodos de resolução

Como já foi referido em 2.2, os problemas de balanceamento consistem em alocar as diversas tarefas a postos de trabalho, de forma a que esta distribuição seja equitativa. Nessas circunstâncias torna-se portanto num problema de otimização combinatória. Há que ter em conta que neste tipo de problemas serão consideradas várias restrições relacionadas com o tipo e funcionalidades das máquinas existentes, as qualificações dos operadores, as gamas operatórias, ou problemas de logística, como ter espaço disponível para armazenar os materiais necessários na produção, ou para armazenar o que vai sendo produzido.

No diagrama da figura 2.4 são mostrados os principais métodos da resolução destes problemas. [7]

De modo a ser mais simples a leitura do problema, é frequente que estes sejam modelados como otimização inteira mista. Nesse modelo vai estar disponível toda a informação acerca do problema:

- Parâmetros de entrada do problema, onde são descritos os dados conhecidos no início do problema;
- Variáveis de decisão;
- Restrições, onde estão explicadas matematicamente as diversas condições a que o problema está sujeito;
- Função objetivo, onde é descrito o objetivo que se pretende atingir.

Contudo, tratando-se de problemas de otimização combinatória com bastantes variáveis inteiras a ter em conta, e conhecida a complexidade computacional, a utilização de métodos exatos poderá ficar limitada. Exemplos de métodos exatos frequentemente utilizados são o *branch and bound* ou a programação dinâmica.

Poderá então ser aconselhável recorrer a métodos aproximados isoladamente ou em articulação

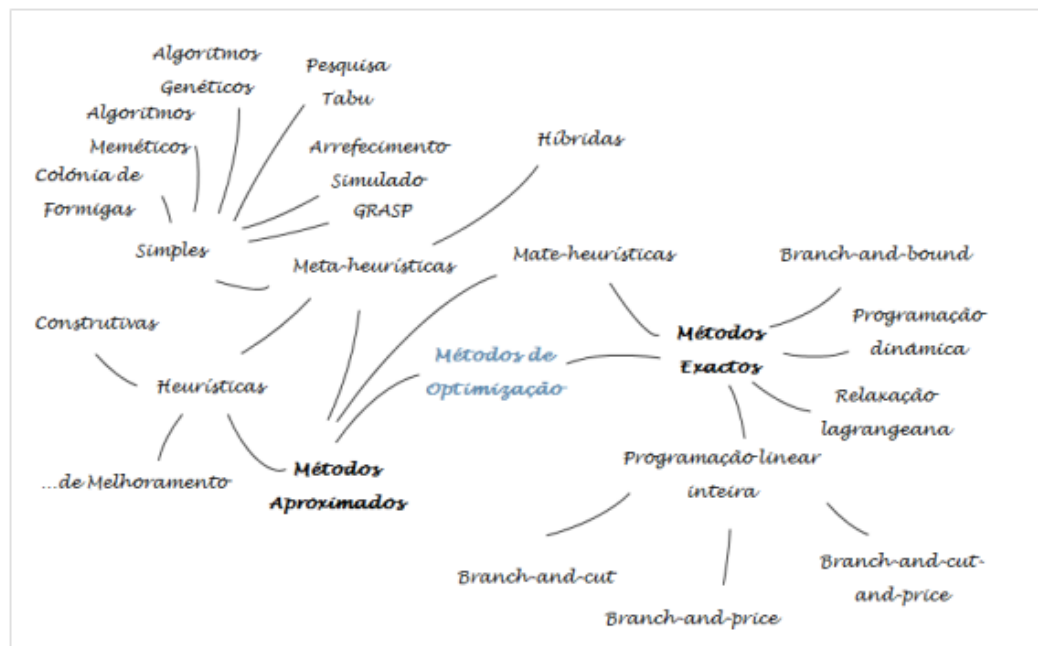


Figura 2.4: Principais métodos de otimização

com métodos exatos. Tais métodos aproximados são as heurísticas ( 2.4.1) e meta-heurísticas ( 2.4.2).

De forma a encontrar uma solução não aleatória inicial para estes métodos, podem ser usadas diferentes heurísticas que apesar de não devolverem resultados ótimos, encontram fácil e rapidamente uma solução, que mais tarde poderá ser utilizada como ponto de partida para a utilização de uma meta-heurística, como é o caso do presente projeto.

Depois de aplicados os métodos, é usual recorrer-se a simuladores para se efetuar diversos testes com o intuito de verificar se os resultados estão dentro do esperado.

### 2.4.1 Métodos heurísticos

Heurística é uma técnica capaz de obter soluções admissíveis, com um custo computacional baixo. Contudo esta não garante que a solução seja ótima, e por vezes nem informação sobre a qualidade da solução é dada. [8]

Existe neste momento um grande número de heurísticas, sendo possível e útil agrupá-las em diversos grupos [9]:

#### Heurísticas de construção

Uma solução vai sendo construída, sem se partir de uma solução inicial;

#### Heurísticas de melhoramento

A partir de uma solução admissível já existente procuram chegar a soluções melhores através de sucessivos melhoramentos;



**Heurísticas de partição e decomposição**

Dividem o problema em componentes mais simples, podendo depois ser resolvidas em sequência ou independentemente;

**Heurísticas dedicadas**

Aproveitam características específicas do problema em causa.

No intuito deste trabalho é necessário referir três dessas heurísticas dedicadas [10] [11] ao balanceamento de operações:

***Largest-Candidate Rule***

São listados todos os tempos de execução das diferentes tarefas de forma decrescente. Em seguida, começando na tarefa de maior tempo de execução, procuram-se as tarefas que respeitem a ordem de precedência, sendo essas as primeiras a serem alocadas.

***Kilbridge and Wester's Method***

As tarefas vão ser alocadas tendo em conta o número de tarefas precedentes. É também chamado método da coluna pois uma forma de representação é ordenar o grafo das precedências por colunas, ou seja, em cada coluna são agrupadas as tarefas com o mesmo número de tarefas precedentes.

***Ranked Positional Weights Method***

Neste método vai ser calculado um peso para cada tarefa, sendo que o peso de uma dada tarefa é igual à soma dos tempos de execução de todas as tarefas que a vão suceder, mais o seu próprio tempo de execução. Em seguida as tarefas são ordenadas pelos seus pesos de forma decrescente, sendo as que tiverem maior peso alocadas primeiro.

**2.4.2 Meta-heurísticas**

As meta-heurística não são algoritmos bem definidos para um dado problema, antes definem estratégias a seguir para se atingir melhores soluções. São aplicáveis, potencialmente, a qualquer problema de otimização, sendo uma das suas vantagens o facto de estas terem meios para evitar a prisão em ótimos locais. [12]

É possível observar vários tipos de meta-heurísticas consoante a estratégia para escapar aos ótimos locais e a forma como a solução é encontrada [13]:

**Inspiradas em processos naturais vs inspiradas em processos não naturais**

Classificação baseada no que originou o algoritmo. São exemplos de origem natural meta-heurísticas como algoritmo genético ou algoritmo das formigas. Exemplo de origem não natural são a pesquisa tabu, ou a pesquisa local iterativa;

**Baseadas em população vs pesquisa em ponto único**

Classificação baseada no número de soluções usadas ao mesmo tempo. As que são baseadas na pesquisa em pontos únicos podem ser chamadas de métodos de trajetória, como é o

caso da pesquisa tabu e da pesquisa local iterativa. Por sua vez, as baseadas em população mostram a evolução de um dado conjunto de pontos do espaço;

### **Objetivos dinâmicos vs objetivos estáticos**

São classificadas tendo em conta a variação da sua função objetivo ao longo do processo;

### **Uma vizinhança vs vizinhanças variáveis**

A grande maioria das meta-heurísticas usam apenas uma vizinhança, ou seja esta não se altera aquando a execução do algoritmo. Por outro lado, existem meta-heurísticas como a pesquisa em vizinhança variável que utiliza diversas vizinhanças;

### **Com memória vs sem memória**

Neste caso as meta-heurísticas são classificadas consoante usarem ou não memória, isto é, se guardam um histórico das pesquisas efetuadas ou não.

Apesar de as meta-heurísticas terem bastante sucesso, tanto a nível académico como a nível industrial, na resolução de problemas de otimização, nem sempre é simples a sua adaptação aos problemas.

Várias das meta-heurísticas, como a pesquisa local iterativa, a pesquisa tabu ou a pesquisa em vizinhança variável, têm como objetivo guiar num dado espaço de pesquisa de forma a ser possível alcançar uma solução consoante determinados parâmetros. Uma das grandes vantagens no uso destes métodos é que são bastante fáceis de parametrizar e são bastante eficazes. [14]

#### **2.4.2.1 Iterated Local Search**

Segundo Lourenço [15], dado um problema de otimização discreta, assume-se que existe uma heurística que retorna uma solução admissível para esse problema (essa heurística é denominada de PesquisaLocal).

Para um dado problema  $P$  com uma dada função objetivo  $f$  é definido um conjunto finito de soluções possíveis  $S$ . Usualmente é pretendido encontrar uma solução do espaço que minimize a função objetivo. Neste tipo de problemas está também presente o conceito de vizinhança  $N$  (2.4.3), que juntamente com o conjunto de soluções anteriormente definido formam o espaço de pesquisa  $S_n$ . Esta estrutura pode ser representada por um grafo. A heurística PesquisaLocal pode ser então entendida como um algoritmo que percorre o grafo  $S_n$  a partir de um dado nó inicial. Esse algoritmo acaba quando é encontrado um ótimo local  $s^l$ . Outros termos importantes quando se menciona esta meta-heurística é o de perturbação e critério de aceitação. Entende-se por perturbação como número de movimentações para a vizinhança. No caso em estudo, indústria do calçado, são exemplo dessas movimentações a troca de tarefas entre postos, ou a transferência de tarefas de um posto para outro. Por sua vez, o critério de aceitação vai determinar qual dos ótimos locais, se o encontrado na iteração atual ou na anterior, é escolhido para ser perturbado.

Podemos então definir o algoritmo da ILS da seguinte forma [16]:

1:  $s \leftarrow \text{gera}()$

```

2:  $s^l \leftarrow \text{pesquisalocal}(s)$ 
3: repete
4:  $s \leftarrow \text{perturba}(s^l, \text{memória})$ 
5:  $s^{l*} \leftarrow \text{pesquisalocal}(s)$ 
6:  $s^l \leftarrow \text{aceita}(s^l, s^{l*}, \text{memória})$ 
7: até condição de paragem ser verdadeira

```

O termo "memória" é uma estrutura de dados adicional que permite saber quais as soluções já visitadas.

### 2.4.3 Vizinhaça

É vizinhaça de uma solução  $S$  o conjunto de soluções  $S'$  que podem ser obtidas a partir de  $S$ . [17]

No contexto de problemas de balanceamento, Vilarinho e Simaria [18] obtêm as soluções vizinhas da seguinte forma:

- Pela troca entre duas tarefas de postos de trabalhos diferentes;
- Transferindo uma tarefa de um posto de trabalho para outro.

Em qualquer um dos casos, tanto as limitações de tempo das estações de trabalho como as precedências das tarefas têm de continuar a ser respeitadas. Para além disso, como é obvio, apenas no caso da transferência de tarefas de um posto para outro permitirá a redução de postos de trabalho em funcionamento.

## 2.5 Aplicação de heurísticas de balanceamento

O caso de estudo neste projeto envolve uma linha de produção de modelos misturados, do tipo *unpaced* e síncrona. Da revisão de literatura feita, apenas um artigo se aproxima deste género de problema. Chiang, Urban e Xu [19] aplicaram num problema de linhas de produção do tipo *unpaced* síncrona a meta-heurística pesquisa tabu a fim de atingir dois objetivos: minimizar os postos de trabalho e aumentar a taxa de produção. Com os resultados obtidos computacionalmente, concluíram que as linhas do tipo *unpaced* síncronas são bastante eficientes comparativamente às linhas do tipo *paced*, e que a eficiência relativa é maior em situações onde existem grandes variações de tempos de tarefas, comparativamente a quando essas variações são mais pequenas.

Por sua vez, Chen, Chen, Su, Wu e Sun [20], resolveram um problema de balanceamento de linhas de costura para a indústria do vestuário, indústria algo parecida com a estudada neste projeto. A resolução passou por desenvolver algoritmos genéticos para ALBP com operadores de diferentes níveis. Estes algoritmos podem alocar o mais uniformemente possível as tarefas aos postos de trabalho com o mesmo nível, minimizando o desvio médio absoluto. Para além do objetivo de minimizar o desvio médio absoluto ter sido alcançado, concluíram que alocando mais operadores

a estações de trabalho, e dando formação a esses trabalhadores para que possam ser mais versáteis, fazia minimizar o desvio médio absoluto, o tempo de ciclo, e aumentar a produtividade. Concluíram também que para operadores mais versáteis era mais simples aumentar a sua taxa de ocupação.

De uma forma mais geral, é possível ver que já existem bastantes estudos feitos sobre balanceamento de linhas de produção, sendo que muitos deles se baseiam na aplicação de métodos heurísticos para a resolução de problemas baseados no SALBP. Exemplo disso foi a abordagem de Scholl e Voß [21], que descreveram heurísticas a utilizar para o SALBP-1 e SALBP-2. Nesse estudo tentaram focar-se em encontrar uma solução exequível, bem como encontrar formas de melhoria. Esse melhoramento consiste em movimentações de tarefas entre postos de trabalho. Combinaram esse melhoramento com o método de pesquisa tabu, sendo que os resultados disto foram bastante positivos.

No que toca a exemplos de produção misturada, temos o exemplo do estudo de Simaria e Vilariño [18]. Neste caso, apresentam um modelo matemático para linhas de produção misturada com estações de trabalho paralelas. O primeiro objetivo aqui é a minimização do número de postos de trabalho para um dado tempo de ciclo, sendo que o objetivo seguinte é o equilíbrio da carga de trabalho entre postos. Para tal desenvolveram um algoritmo com dois passos, em que numa primeira parte se pretende atingir uma solução sub-ótima para o primeiro objetivo, e numa segunda parte aplica-se outro algoritmo para se atingir o segundo objetivo.

Num estudo mais geral, Merengo, Nava e Pozzetti [22] descrevem também os principais problemas encontrados em produções misturadas. Dividem também o processo de balanceamento em três fases distintas:

- Primeiramente, procura uma solução inicial com um bom balanceamento horizontal;
- A seguir, tenta melhorar a solução anterior. Esse melhoramento passa pela redução do número de estações de trabalho, isto sem que o balanceamento horizontal não seja prejudicado;
- Por fim tenta refinar a solução obtida anteriormente, fazendo um balanceamento vertical que permitirá uma distribuição uniforme da carga de trabalho entre os postos. O balanceamento horizontal não deve ser prejudicado, bem como o número de estações de trabalho não deve aumentar.

## 2.6 Resumo

Após análise dos artigos encontrados, excetuando um artigo que já aborda as linhas de produção do tipo *unpaced* síncrona, quase nenhum descreve a situação do presente projeto. Contudo, dos artigos referidos em 2.5 podemos ver que vários dos conceitos a utilizar neste projeto de dissertação já foram sendo estudados. Desses destacam-se nomeadamente o facto de se dividir o problema em dois passos, o primeiro onde se utilizarem métodos heurísticos para se obter soluções iniciais que possam ser executadas na linha de produção, bem como um segundo passo onde se aplicam outros métodos de melhoramento sobre essa solução inicial.

É também possível ver que as questões acerca do balanceamento vertical e horizontal também já é um assunto que vem sendo debatido nos últimos tempos.

## Capítulo 3

### Caso em estudo

Como foi referido no capítulo 1 de introdução deste documento, este projeto insere-se numa iniciativa do INESC TEC cujo objetivo é criar uma nova linha de produção que, usando métodos complexos para o balanceamento das suas operações, obtenha níveis de produtividade bastante elevados, respondendo assim às exigências dos mercados atuais.

Tendo em conta que a equipa do INESC já se encontrava a trabalhar numa heurística dedicada para balanceamento das linhas de produção, a *Ranked Positional Weights Method*, foi proposto que a resolução agora fosse feita por outros métodos, a fim de no final se poderem comparar os resultados e tentar perceber qual compensaria mais implementar. Sendo assim, inicialmente vai ser aplicada a heurística *Kilbridge and Wester's Method* para obter uma solução inicial. Visto que com essa heurística não existe uma grande preocupação no número de postos necessários, cuja minimização é a função objetivo (3.4), em seguida vai ser aplicada uma meta-heurística que seja capaz de o fazer. Para esse fim, foi escolhido implementar a meta-heurística *Iterated Local Search* visto esta ter mostrado bons resultados, e de ser de uma complexidade de implementação relativamente baixa.

No restante deste capítulo é então dada uma visão geral sobre esta nova linha de produção e das suas características, forma de balanceamento da linha e objetivos a atingir.

#### 3.1 Nova linha de produção

Nesta secção vai ser descrito de um modo sucinto esta nova linha de produção, bem como a apresentação de algumas das principais vantagens da mesma.

Na figura 3.1 é mostrado uma parte do *layout* da linha. Como se pode observar todos os postos de trabalho estão ligados através de um corredor por onde é efetuado o transporte das diferentes caixas. Nestas caixas vão circular os modelos de sapatos a produzir. Devido à ligação entre todos os postos de trabalho, foi possível abandonar o sistema tradicional no qual, a seguir a cada posto de trabalho, as caixas seguem para um armazém. Nesta nova linha isso não acontece, sendo esse armazém substituídos por *buffers* nos próprios postos de trabalho.

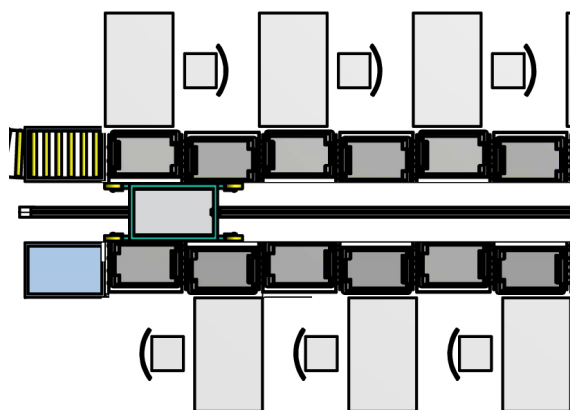


Figura 3.1: Layout da nova linha

A figura 3.2 representa o design de um posto de trabalho. Através da imagem pode ser observado que para além do posto de trabalho em si, ilustrado na figura por uma mesa, podemos ver dois patamares, ligados à rede de transporte da linha, que serão os *buffers* onde as caixas vão esperar para entrar em produção ou para seguirem para outro posto.

Em suma, estas características fazem com que a linha ocupe menos espaço devido à não necessidade de um armazém dedicado, bem como apresenta uma agilidade única que permite que facilmente as caixas circulem de um posto para outro.

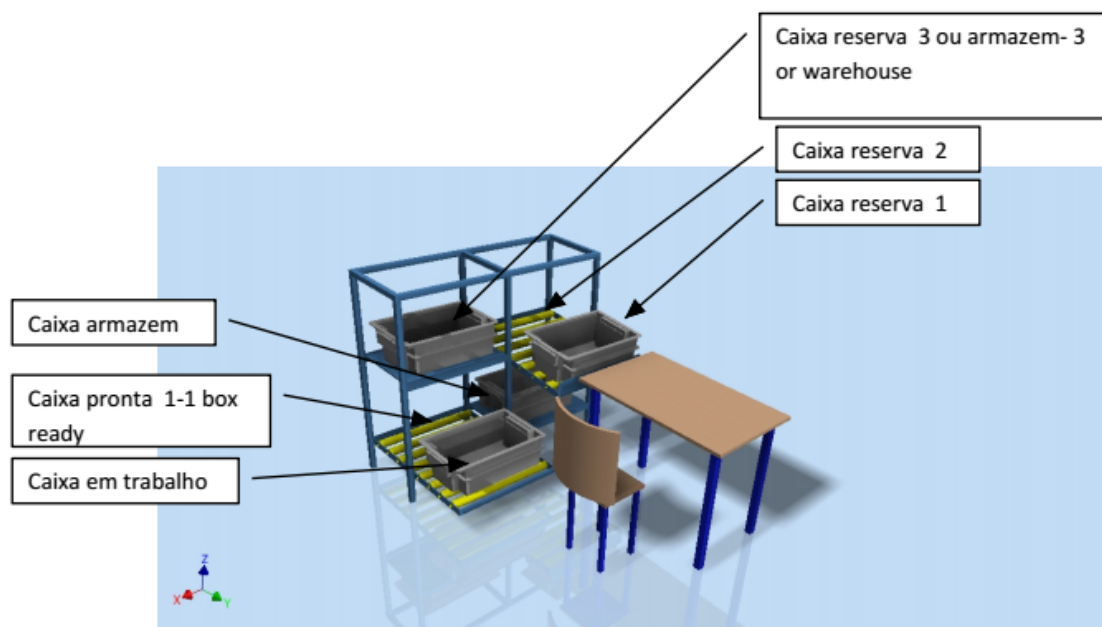


Figura 3.2: Design de posto de trabalho

## 3.2 Características

Após o estudo das características da linha, e tendo em conta o tipo de produção que nela se pretende, para este projeto a linha vai ser definida como uma linha do tipo *unpaced* síncrona. No capítulo seguinte vai ser explicado de forma mais aprofundada o porquê de se ter optado pela versão síncrona e quais as suas implicações.

Em termos de recursos, os postos de trabalho são constituídos pela combinação operador-máquina, ou então só operador. Existem operadores com diferentes competências, um pouco à semelhança do que acontece em [20], onde cada um deles capaz de executar tarefas, assim como vão existir diferentes tipos de máquinas. No caso em estudo vai ser permitido que operadores de nível mais elevado do que o mínimo exigido para executar a tarefa a possam realizar, contudo o tipo de máquina exigido terá de ser respeitado. Isto torna-se particularmente importante pois cada tarefa vai exigir requisitos nos postos de trabalho, seja em termos de necessidades de um dado nível de operador a executar a tarefa, como um tipo específico de máquina a utilizar. No entanto esses recursos vão estar individualmente limitados pelo tempo máximo que cada posto pode estar a operar.

Ao nível de produção, esta linha vai seguir o conceito geral, ou seja, vai existir um plano de produção para o dia em causa, onde é dado o tipo de modelos a produzir e informação sobre a quantidade a produzir para cada modelo. É também dado neste plano de produção o tamanho do sapato a produzir, embora para o estudo deste projeto essa informação seja algo irrelevante. Para cada modelo a produzir vai existir uma gama operatória, onde vai estar presente tanto a sequência das tarefas a executar, bem como o tempo necessário para cada uma delas.

Outro parâmetro de entrada bastante importante vai ser o tamanho das caixas que vão circular pela linha. É importante frisar que em cada caixa só poderá ir um dado modelo, mesmo que não seja atingido o limite máximo da caixa. O tamanho das caixas vai ter bastante influência no problema pois se é verdade que caixas mais pequenas são mais fáceis de alocar, visto ocuparem menos intervalos de tempo, por outro lado se a dimensão das caixas for muito baixa vão existir demasiadas caixas a circular pela linha o que poderá provocar congestionamentos no transporte.

## 3.3 Método de balanceamento

Para tirar o máximo partido das potencialidades acima referidas, é necessário fazer um correto balanceamento da linha. Através do levantamento do estado da arte, não foi possível observar nenhum artigo onde se trate explicitamente do tema desta dissertação. Apenas em [19] é referida uma abordagem à resolução de problemas de balanceamento das linhas do tipo *unpaced* síncronas. Uma possível causa deste género de problema não ser tão divulgado deve-se principalmente ao facto de que, num mercado tão competitivo como é a indústria do calçado, todos os seus intervenientes não queiram passar informação aos seus mais diretos competidores. Para além disso, há que ter em conta que a própria linha é nova, tendo esta funcionalidades únicas que as linhas atuais não possuem.



Sendo assim, os conceitos aprendidos com a revisão bibliográfica no que toca a abordagens para a resolução deste tipo de problemas vão ter de ser adaptadas para o problema em causa neste estudo, onde a principal diferença para os outros é o facto de se tratar de uma linha de produção misturada.

### **3.4 Objetivos**

Para a empresa para a qual está a ser desenvolvido o estudo desta linha a principal preocupação é saber qual o número de operadores necessários. Sendo assim, o principal objetivo deste balanceamento vai ser minimizar o número de postos de trabalho, desde que a produção não seja afetada. É importante também referir que vão existir outros objetivos secundários, tais como haver uma homogeneização no tempo de ocupação dos diversos postos de trabalho em uso.

## Capítulo 4

# Abordagem e método de resolução

Ao longo deste documento, tem vindo a ser referido que a linha em causa está a ser estudada como sendo uma linha de produção misturada, *unpaced* síncrona, onde vai ser produzida uma grande diversidade de calçado. Nas secções 4.1 deste capítulo vai ser dada a explicação de como e porquê se considera esta linha *unpaced* síncrona. Por sua vez na secção 4.2 vão ser referidas as características de produção deste tipo de indústria, onde vai ser mostrado um grafo de tarefas típico para a produção de um par de sapatos, bem como neste problema se consegue agregar a produção de sapatos cujos grafos são completamente diferentes. Essas noções vão ser importantes para se compreender algumas das adaptações feitas.

Após a introdução desses conceitos e adaptações básicas, vai ser visto em detalhe nas secções seguintes a forma como o problema foi estruturado, e como os algoritmos utilizados no projeto foram sendo implementados.

A figura 4.1 ilustra o processo de resolução implementado, desde a leitura dos dados até à obtenção da solução final.

De referir que para a resolução deste problema, foi criado um programa em C++ que tem por base os passos descritos ao longo deste capítulo.



Figura 4.1: Processo para obter solução final

### 4.1 Linha do tipo *unpaced* síncrona

Conforme mencionado na revisão bibliográfica (capítulo 2) existem linhas do tipo *paced* e *unpaced*, sendo este subdividido em síncrono e assíncrono. As características desses tipos são

resumidas na tabela 4.1 retirada de [19].

	Síncrono	Assíncrono
<i>Paced</i>	Linha avança quando tempo de ciclo é alcançado. Existe o risco de tarefas não serem realizadas.	N/A
<i>Unpaced</i>	Linha avança apenas quando todas as estações de trabalho terminam o seu trabalho. O balanceamento da linha é baseado no tempo máximo esperado disponível em cada posto.	Avança quando cada estação de trabalho termina a sua tarefa e a estação seguinte se encontra livre. Podem ser também utilizados <i>buffers</i> para compensar algum desvio no tempo de execução da tarefa. A colocação e capacidade dos <i>buffers</i> são decisões também a ter em conta no balanceamento.

Tabela 4.1: Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de produção

No problema em estudo o balanceamento da linha vai ser feito tendo em conta o tempo disponível em cada posto de trabalho. Sendo assim, este projeto é abordado como sendo do tipo *unpaced*. Relativamente ao sincronismo, por uma questão de facilidade de implementação foi definido ser síncrona, ou seja, só avança depois de todas as tarefas serem realizadas. Esta medida por sua vez poderá em determinadas situações facilitar o melhoramento da solução através da meta-heurística *Iterated Local Search*. Essa situação vai ser abordada na secção 4.7.

Neste projeto as tarefas vão ser alocadas pela ordem de precedência, como vai ser visto em 4.2 e 4.5, visto isso ser a base do método *Kilbridge and Wester's Method*, ou seja, uma tarefa de um dado nível de precedência só pode ser alocada depois de todas as tarefas de precedência anterior já estiverem todas alocadas. Por uma questão de facilidade no algoritmo utilizado, se não for possível alocar uma dada tarefa o algoritmo só vai permitir que as restantes tarefas de precedência igual a essa sejam alocadas, não avançando para a alocação das tarefas de precedência seguinte.

## 4.2 Gama operatória do calçado

Como já foi referido nos capítulos iniciais, neste género de indústria existem gamas operatórias onde são descritas as tarefas a executar para a produção de um produto. Muitas vezes essas precedências são apresentadas em forma de grafo, onde podem estar descritas várias informações, como nome ou código da tarefa a executar, ordem de precedência, tempo de execução, entre outros. Na fase de produção em estudo neste projeto, a de costura, convém referir que em cada nível de precedência só vai existir uma tarefa, isto acontece porque para o mesmo par não é possível executar múltiplas tarefas ao mesmo tempo. Sendo assim, o grafo de precedência para a execução de um dado modelo pode ser descrito como o exemplo da figura 4.2.

Pode-se constatar que para a produção deste modelo vai ser necessário a execução de três tarefas distintas: tarefa 10, tarefa 20, tarefa 30. No mesmo grafo observa-se que a ordem de execução



Figura 4.2: Exemplo de grafo de precedência para a construção de um par de sapato

das mesmas terá de ser 10-30-20. Importa também referir que devido à existência de diversos modelos a produzir, todos eles de complexidade diferente, os grafos de precedência não vão ter todos necessariamente o mesmo número de tarefas.

Neste caso não vai ser possível agrupar tarefas iguais de modelos diferentes, pois cada operador só pode trabalhar numa caixa de cada vez, e na mesma caixa não podem ser incluídos modelos diferentes. Foi então concluído que no problema em estudo cada caixa vai ter de ser tratada individualmente como se de um modelo próprio se tratasse.

### 4.3 Dados do problema

Nesta secção apresentam-se considerações sobre este problema, acerca de como são os postos de trabalho, a nível de operadores e máquinas, ou limitação de tempo, como também algumas noções sobre as caixas que vão circular na linha.

É importante referir desde já que os dados que foram utilizados ao longo deste projeto não são reais, mas sim uma representação aproximada da realidade. No entanto o simulador está preparado para receber dados reais, sendo que para tal basta alterar a informação contida nos ficheiros de texto (4.4).

Em termos de estações de trabalho estas vão ser constituídas por um operador e uma máquina. Cada operador e cada máquina só vão poder estar associados a uma única estação de trabalho. Em termos de operadores há uma distinção entre eles através do seu nível, isto é, consoante o tipo de tarefas que vão ser capazes de executar. Existem quatro níveis, de 1 a 4, sendo que cada operador poderá realizar as tarefas cujas exigências mínimas sejam de nível igual ou inferior ao seu, ou seja, um operador nível 1 só poderá executar as tarefas cujo requisito de operador mínimo seja 1, já um operador de nível 3 poderá executar tarefas cujas exigências de operador sejam 1, 2 ou 3. Já em termos de máquinas vão ser considerados apenas dois tipos: A e B. No caso das máquinas, os requisitos mínimos das tarefas vão ter de ser respeitados, isto é, a máquina do tipo A só poderá executar tarefas cuja necessidade seja máquina do tipo A, e o mesmo se passa para as máquinas do tipo B.

Nos postos de trabalho vai existir outra condicionante, o tempo limite máximo de produção, resultante de ser uma linha do tipo *unpaced* síncrona. Visto que o objetivo no final é de comparar a solução obtida com as soluções obtidas pela equipa do INESC TEC, foi usado o mesmo tempo máximo que é de 25800 segundos, cerca de 7.18 horas de trabalho, em cada posto de trabalho.

Por fim, outro aspeto importante a referir prende-se com a quantidade máxima de pares de sapatos em cada caixa que vai circular pela linha. Por um lado é preciso ter em conta que se a capacidade máxima das caixas for pequena a sua alocação poderá ser facilitada, contudo vão existir demasiadas caixas a circular na linha o que pode causar problemas de circulação entre postos. Por outro lado, se a caixa transportar uma quantidade muito grande, pode causar problemas de atraso, pois um operador pode ficar sobrecarregado e, como a produção só avança quando todos os postos acabam as suas tarefas, toda a linha tem de ficar em esperar. Do que foi possível apurar, as caixas utilizadas atualmente na empresa envolvida no projeto têm uma capacidade máxima de 10 pares de sapatos.

## 4.4 Organização dos dados

Após haver noção sobre o tipo de dados usados (4.3), uma das decisões a tomar foi escolher a melhor forma de como estes seriam guardados. Primeiramente, foi decidido nesta fase do projeto usar simples ficheiros de texto, tanto pela sua facilidade de leitura através do programa de C++ desenvolvido, bem como também pela facilidade de alterar os valores neles contidos, o que facilita bastante na parte de teste. Tendo isto em conta, foram então criados 4 ficheiros de texto principais:

- Um ficheiro onde são mostradas as necessidades de operador e máquina para executar determinada tarefa, o ficheiro "necessidade.txt". De referir que a mesma tarefa tem os mesmos requisitos na produção de modelos diferentes, contudo o seu tempo de execução pode variar;
- Um ficheiro onde são colocados o nome e nível de cada operador. Na linha de costura os postos de trabalho em causa vão ter sempre um operador, logo vai ser através deste ficheiro, "operador.txt", que vamos definir o número máximo de estações de trabalho;
- Um ficheiro onde é dada informação dos modelos a produzir denominado "producao.txt". Neste ficheiro é contida também informação adicional dos modelos a produzir como quantidade e tamanho;
- Um ficheiro "modelos.txt" onde estão listados todos os modelos conhecidos que se vão poder produzir. Para cada modelo existe um novo ficheiro de texto chamado de "codigo-do-modelo.txt", onde é mostrada a sequências de tarefas a seguir para o fabrico dos produtos, bem como a duração média de cada uma dessas tarefas para um par de sapatos.

A leitura destes ficheiros é o primeiro passo do programa desenvolvido. A partir dessa leitura vão ser carregados diversos vetores onde vai estar presente toda a informação obtida que vai ser utilizada nos diversos testes.

## 4.5 Adaptação da heurística KWM

Como é possível ver na secção anterior, a organização dos dados foi feita de uma forma lógica para o utilizador os poder observar e/ou alterar. Contudo essa informação vai ter de ser moldada

para poder ser processada pelo algoritmo desenvolvido. É relevante referir que no programa desenvolvido foi tirado partido da capacidade do C++ de criar classes de objetos, o que permitiu criar diversos vectores para os diferentes tipos de informação recolhida dos diversos ficheiros de texto. Após todas as considerações descritas ao longo do documento foi então feita a adaptação dos dados do problema para que esses fossem resolvidos pela heurística *Kilbridge and Wester's Method*. Para tal o algoritmo desenvolvido em C++ foi estruturado da seguinte forma: inicialmente vão ser lidos os ficheiros de texto onde está contida a informação dos modelos a produzir, dos operadores existentes, e das necessidades de cada tarefa. Cada uma dessas informações foi guardada num vetor correspondente. De seguida é tratado o ficheiro onde está contido o plano de produção. Visto que é aqui que grande parte da adaptação dos dados é feita, o processamento dos dados deste vai ser descrito agora em maior detalhe. Os dados contidos nesse ficheiro vão ser carregados um vetor temporário onde vão estar descritos quais os modelos a produzir e qual a quantidade a produzir desse modelo. De seguida o programa vai criar um novo vetor, onde vai colocar todas as tarefas dos modelos a produzir, ou seja, em vez de existir um vetor com o modelo a produzir e a quantidade, passa a existir um vetor com o conjunto de todas as tarefas a executar para todos os modelos. De seguida é averiguado o número de caixas que vai ser necessário para executar toda a produção do plano. O programa vai ler a quantidade a produzir do modelo em causa, se a quantidade for menor ou igual à capacidade total da caixa, cria apenas uma caixa com todos os pares, caso a quantidade seja superior vão ser criadas novas caixas até que a quantidade máxima por caixa seja respeitada. Por exemplo, se a quantidade a produzir para um dado modelo for de 23 pares de sapatos, e as caixas tiverem capacidade máxima para 10 pares, o programa vai então criar 3 caixas, duas delas com 10 pares, e a terceira com apenas 3.

Por fim, estando criado o vetor de toda a produção vai ser aplicado um algoritmo de ordenação, onde o vetor que contém as tarefas a realizar vai ser ordenado pelo atributo de ordem de precedência. Com isto vai ser obtida a lista, de forma ordenada por ordem de precedências, de todas as tarefas a serem executadas, estando então tudo preparado para a aplicação da heurística *Kilbridge and Wester's Method*. A figura 4.3 contém o fluxograma onde está descrito todo este processo de desenvolvimento do algoritmo.

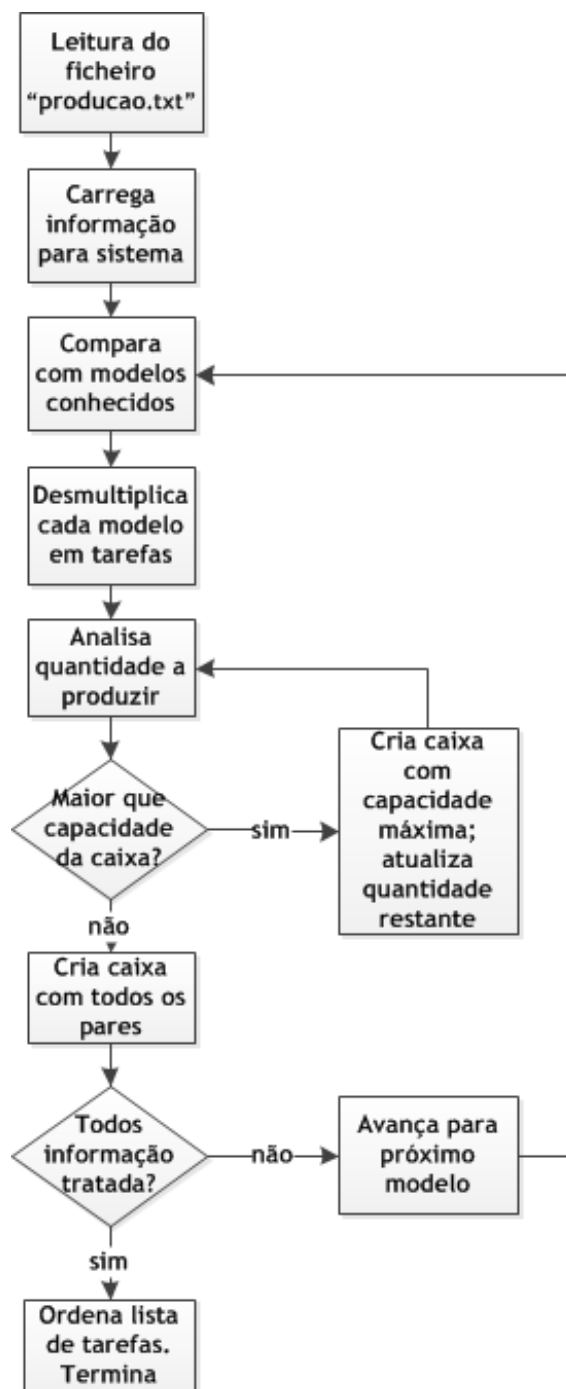


Figura 4.3: Processo de adaptação do plano de produção

## 4.6 Aplicação da heurística KWM adaptada

Para aplicação da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada, existem diversos vetores, sendo os mais relevantes para a explicação da alocação das tarefas os vetores correspondentes aos postos de trabalho, o vetor onde estão todas as tarefas ordenadas a executar, e o vetor das necessidades mínimas de cada tarefa. Importa também lembrar que cada posto de trabalho vai ter um tempo de produção máximo.

A alocação das tarefas segue então um processo bastante linear: é lida a primeira tarefa do vetor a alocar e vista quais as suas necessidades mínimas. É então percorrido o vetor de todos os postos e comparado o nível de operador e o tipo de máquina. Se o operador e a máquina do posto forem iguais às necessidades mínimas, e o tempo máximo da estação de trabalho não for ultrapassado com a alocação da tarefa, esta é lá alocada e passa-se para a alocação da tarefa seguinte. Se não for possível alocar, continua a pesquisa no vetor de postos. Se por algum motivo não for possível alocar uma tarefa a nenhum dos postos, é tentado novamente alocar a tarefa, contudo dessa vez já é possível alocar a tarefa a um posto de trabalho com um operador de nível superior ao mínimo exigido. Se ainda assim não for possível alocar, é dada a informação que tal não foi possível e avança para a alocação da próxima tarefa. É importante referir que existe um sistema de paragem no programa que nestas situações em que uma tarefa não é alocada, aciona uma *flag* de paragem. Essa *flag* vai ser lida sempre que há transições de ordem de precedência, sendo que se estiver acionada não vai permitir ao programa avançar.

Outro aspeto importante prende-se com a questão da evolução do tempo das estações de trabalho na simulação. Tendo em conta as restrições da linha ser do tipo *unpaced* síncrona, só faz sentido que as tarefas de ordens de precedência maiores sejam alocadas num tempo de simulação pelo menos superior ao fim do último tempo de execução das tarefas de precedência de ordem anterior. De forma a evitar esse problema, sempre que há mudança de ordem de precedência nas tarefas a alocar é visto qual dos postos de trabalho "gastou" mais tempo na alocação das tarefas dessa precedência - esse tempo vai ser denominado tempo limite de precedência - que vai terminar, sendo depois ajustado o tempo de todas as estações de trabalho para que todas comecem no mesmo tempo a alocação de tarefas da precedência seguinte. Dessa forma é garantido que qualquer tarefa de ordem de precedência superior só é alocada num tempo onde todas as de precedência anterior já tenham sido concluídas, por outro lado, numa estação de trabalho que não tenha sido realizada qualquer tarefa o seu tempo vai sofrer também ele uma adaptação ficando a sua capacidade de produção limitada. Uma possível solução para esse problema passará por incluir numa versão futura do simulador a possibilidade de fazer turnos de trabalho com tempos de início de trabalho diferentes.

Visto que a alocação das tarefas vai começar sempre pelo mesmo posto, foi necessário incluir também uma restrição de tempo por precedência, ou seja, para cada nível de precedência vai existir um tempo limite que a partir do qual não vai ser possível alocar lá tarefas. Não foi possível alcançar uma expressão numérica para chegar ao valor ideal deste limite, mas com base nos testes efetuados, esse valor vai variar consoante o esforço exigido a determinado tipo de estação e com



o número desse tipo de estações disponíveis na linha. Contudo essa relação não é linear pois a mesma tarefa poderá ser executada em múltiplos postos, bem como em precedências mais avançadas esse limite teria de ter em conta também o tempo de simulação já utilizado. No entanto este limitador de tempo por um lado vai permitir uma melhor distribuição do trabalho pelos diversos postos de trabalho, por outro vai evitar problemas relacionados com as características das linhas *unpaced* síncronas. De lembrar que neste tipo de linha só se avança para a alocação das tarefas de ordem superior se todas as de precedência anterior já tiverem sido alocadas. Ora, se um posto fosse muito carregado para uma determinada ordem de precedência podia dar-se o caso de que, sem a limitação de tempo, a alocação das tarefas de precedências seguintes poderia ficar comprometida. Por sua vez, visto que há o acerto dos tempos no final de cada precedência, todos os postos teriam já atingido o seu máximo e não seria possível alocar mais tarefas, mesmo que mais nenhuma estação de trabalho estivesse ocupada.

No final da alocação, tenha sido ela totalmente feita ou não, é também retido o valor usado em cada nível de precedência. Esse valor vai ser bastante útil na aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search*, como vai ser visto em 4.7.

No fluxograma da figura 4.4 é mostrado todo o procedimento descrito nesta secção. Na secção 5.1 são mostrados exemplos básicos dos casos referidos.

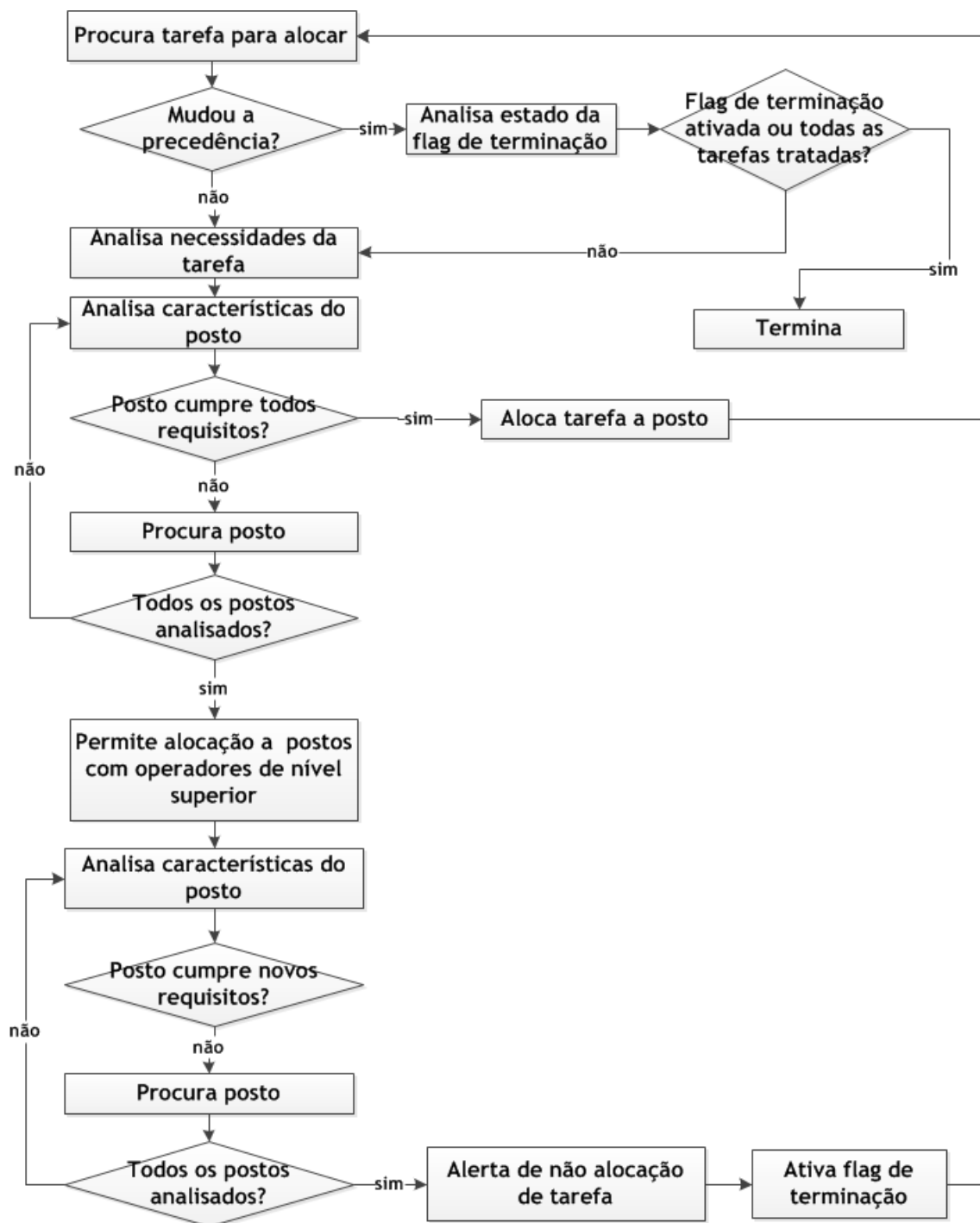


Figura 4.4: Aplicação da heurística KWM adaptada

## 4.7 Aplicação da meta-heurística ILS e obtenção da solução final

Como já foi referido neste documento, a meta-heurística *Iterated Local Search* vai ser usada com o intuito de melhorar a solução obtida através da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada, ou seja, diminuir o número de postos utilizados mantendo o mesmo número de tarefas

alocadas. Para alcançar tal objetivo apostou-se na transferência de tarefas entre postos, de forma a que as tarefas fossem tendencialmente alocadas a determinados níveis de operador, respeitando os requisitos de máquina utilizada.

Tendo estes pressupostos, o primeiro passo feito pelo algoritmo é a procura dum posto de trabalho ao qual esteja alocada pelo menos uma tarefa. Do vetor de tarefas do posto encontrado, o programa vai tentar fazer a transferência de cada uma dessas tarefas. Para isso, para cada tarefa vai ser lido quais as suas necessidades de operador e de máquina mínimas, e em seguida, com base nessas necessidades é gerada uma vizinhança de soluções, que no programa é também ela um vetor. Essa vizinhança por sua vez vai ser constituída por todos os postos de nível igual ou superior às necessidades mínimas da tarefa, exceto o posto ao qual atualmente a tarefa está alocada. De referir que nesta fase para o resultado final apenas vão ser consideradas vizinhas as soluções de nível superior. Contudo as do mesmo nível foram desde já consideradas, pois numa versão futura do simulador essas soluções vizinhas poderão vir a ser muito úteis para um melhor balanceamento vertical.

O passo seguinte é uma simples escolha do vizinho de maior nível de operador de forma iterativa: de entre as soluções possíveis todas vão ser analisadas sendo que a "melhor", ou seja com o posto de nível de operador maior nível possível, é a guardada. De referir que nem todos os vizinhos encontrados poderão não receber a tarefa. A limitação da transferência entre postos de trabalho está no tempo limite de precedência de cada nível calculado através da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada, por exemplo, a tarefa a alocar é de nível de precedência 1, e tem um tempo de execução de 10 unidades de tempo. Por sua vez, o tempo máximo para a precedência 1 é de 12 unidades de tempo, e o vizinho que está a ser analisado já tem uma tarefa de precedência 1 alocada, com tempo de execução 4. Neste caso, apesar do vizinho ser de nível superior, a tarefa nunca poderá ser a ele alocada.

Na imagem 4.5 é mostrado todo o processo anteriormente descrito na forma de fluxograma. Para além disso, na secção 5.1 são mostrados exemplos básicos das trocas de tarefas entre postos através deste procedimento.

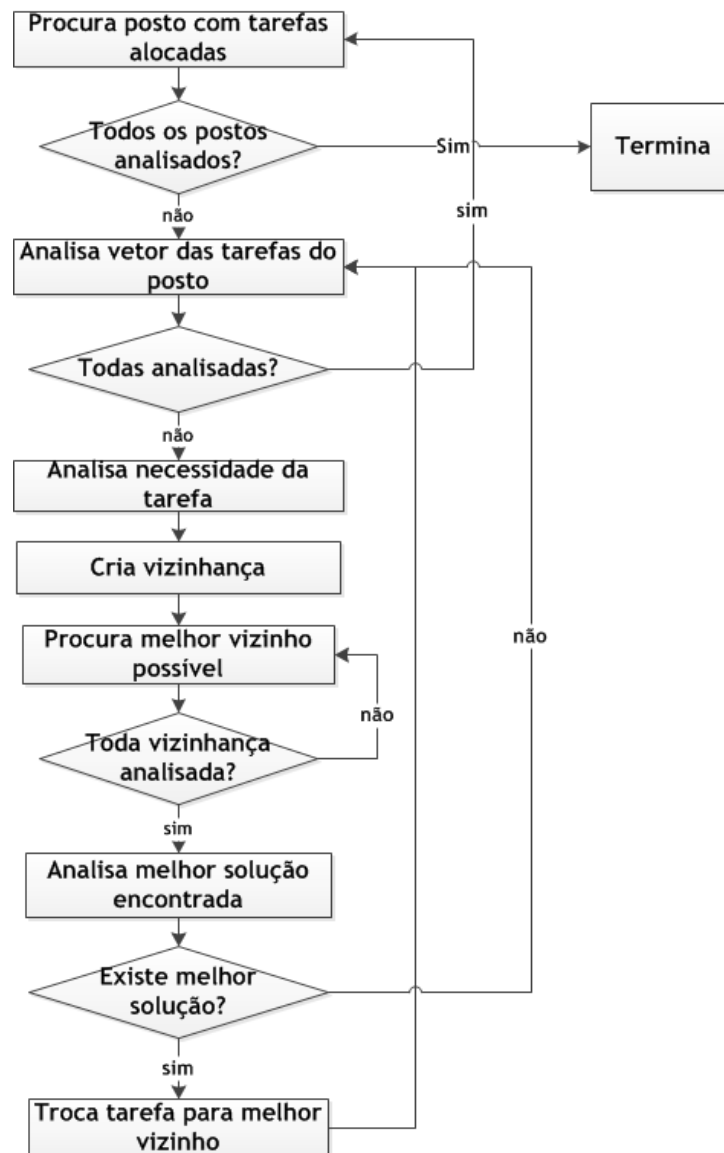


Figura 4.5: Aplicação da meta-heurística ILS

## 4.8 Resumo

Neste capítulo foi descrita a abordagem para o problema em causa, que passou por diversas fases, desde a estruturação dos dados a utilizar e dos ficheiros de texto, pela adaptação desses dados à heurística *Kilbridge and Wester's Method*, até à aplicação da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada e da meta-heurística *Iterated Local Search* ao problema em estudo. Conclui-se desta abordagem que o número máximo de estações que vão ser necessárias, bem como o número de tarefas a alocar, vai depender exclusivamente do resultado da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada. Por sua vez, a meta-heurística *Iterated Local Search* tenta fazer o melhoramento da solução obtida, ou seja, diminuir o número de postos de trabalho.

O código do programa desenvolvido pode ser consultado na página web destinada a este projeto no separador "Documentos", <http://andrefdfigueiroa.wix.com/dissertacao> .

## Capítulo 5

# Discussão de resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através de várias simulações. De referir novamente que os dados utilizados inicialmente não são reais, contudo os analisados na secção 5.2 são já muito próximos de dados reais.

Por outro lado, a fim de ilustrar os algoritmos desenvolvidos no projeto, na secção 5.1 é mostrado um exemplo simplificado. As mesmas ilustrações não foram feitas para os testes da secção 5.2 devido à quantidade de tarefas que teriam de ser representadas. Nesses casos a representação dos resultados obtidos está sob a forma de tabela.

Nestes testes ainda não foi considerado o tempo de transporte de um posto para o outro, contudo isso é algo necessário a ter em conta. Esse tempo na simulação pode ser feito de duas formas:

- considerar o tempo de transporte juntamente com o tempo de produção de cada caixa;
- tratar esse tempo independentemente.

Para efeitos de simulação é considerado que o tempo de transporte está incluído no tempo de execução de cada caixa.

### 5.1 Exemplo simples

Inclui-se seguidamente um exemplo simples para ilustrar o funcionamento dos métodos descritos no capítulo 4.

Em 5.1.2 começa-se por esclarecer como é encontrada a solução inicial pelo método *Kilbridge and Wester's Method* adaptado, e de seguida como a meta-heurística *Iterated Local Search* melhora essa solução. Já em 5.1.3 é feito um teste com variação da capacidade máxima das caixas. De referir que o programa bem como os dados estão disponíveis na página do projeto no separador "Documentos", <http://andrefdfigueiroa.wix.com/dissertacao>.

Os dados do teste que se segue estão disponíveis na secção 5.1.1.

As imagens apresentadas de seguida não foram feitas pelo simulador desenvolvido, mas os valores ilustrados foram obtidos por simulação.

### 5.1.1 Dados utilizados

Nas tabelas seguintes está contida a informação acerca dos dados utilizados para executar o exemplo básico.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 está a informação relativa à sequência de tarefas que é necessária executar para cada modelo, bem como a duração das mesmas.

Por sua vez, as necessidades mínimas para a execução de cada tarefa encontram-se na tabela 5.3, e a constituição de cada posto de trabalho na tabela 5.4.

O plano de produção do exemplo é apresentado na tabela 5.5.

Tarefa	Modelo_m1	Modelo_m2	Modelo_m3	Modelo_m4	Modelo_m5
#1	10	50	20	10	50
#2	20	10	30	30	40
#3	30	40	10	50	20

Tabela 5.1: Código e sequência das tarefas a executar para cada modelo

Tarefa	Modelo_m1	Modelo_m2	Modelo_m3	Modelo_m4	Modelo_m5
#1	5	2	3	4	3
#2	5	3	6	3	3
#3	2	3	5	2	2

Tabela 5.2: Duração das tarefas a executar para cada modelo

Código tarefa	Operador	Máquina
10	2	A
20	3	B
30	3	A
40	1	B
50	4	A

Tabela 5.3: Necessidades mínimas para a execução das tarefas

Posto	Operador	Máquina
1	4	A
2	4	B
3	3	A
4	3	B
5	2	A
6	2	B
7	1	A
8	1	B

Tabela 5.4: Constituição dos postos de trabalho

Modelo	Quantidade	Tamanho
Modelo_m1	10	33
Modelo_m2	10	33
Modelo_m3	10	33
Modelo_m4	10	33
Modelo_m5	10	33

Tabela 5.5: Plano de produção

### 5.1.2 Heurística KWM adaptada e ILS

Primeiramente é necessário correr a heurística de forma a confirmar que este está de facto a funcionar corretamente. Na figura 5.1 está ilustrado o resultado obtido após aplicada a heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada aos dados anteriormente apresentados.

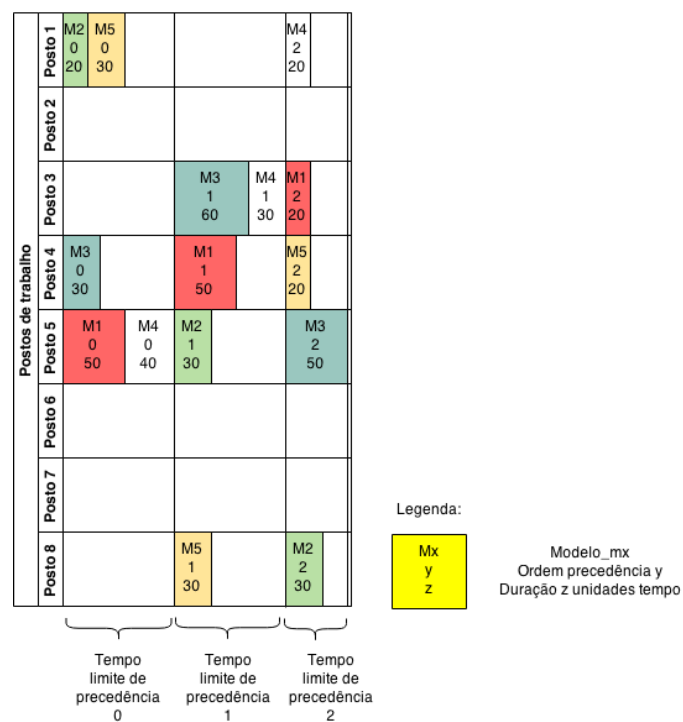


Figura 5.1: Resultado após aplicação da heurística KWM adaptada

Na figura é possível ver que existem os 8 postos de trabalho, e depois no seguimento de cada um desses postos existem diversos retângulos coloridos que representam as tarefas, sendo que cada cor representa um dado modelo a produzir. Para além disso nos retângulos é dada informação acerca da tarefa em causa. Por exemplo, no posto 4 a primeira tarefa tem indicado "M3,0,30", o que significa que corresponde a uma tarefa do modelo M3 a produzir, que corresponde a uma tarefa de precedência nível 0, e que para tratar dos 10 pares da caixa vão ser necessárias 30 unidades de tempo.

Convém referir que neste teste não foi aplicado nenhum limitador de tempo para as precedências, ou seja, as tarefas foram sempre alocadas ao posto exatamente igual às suas necessidades mínimas.



Facilmente é observável que o algoritmo aloca as tarefas aos postos cujas características são iguais aos requisitos mínimos de cada tarefa. É também importante falar do tempo limite de precedência, tempo esse que é o necessário para executar todas as tarefas de uma dada precedência, pois essa vai ser a limitação à qual vai estar sujeita a meta-heurística *Iterated Local Search*. Essa marca temporal está assinalada por uma linha vertical.

O resultado da aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search* é apresentado na figura 5.2.

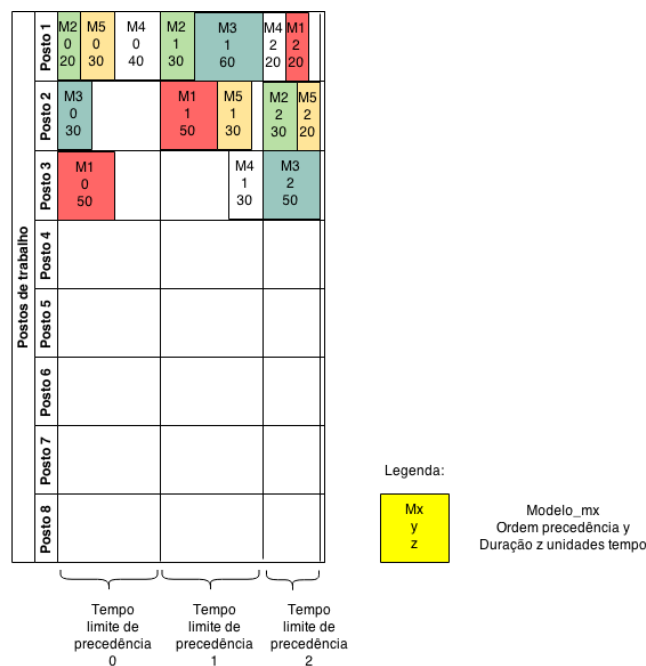


Figura 5.2: Resultado após aplicação da meta-heurística ILS

A primeira conclusão a tirar é que neste teste simples a meta-heurística foi bastante eficiente, pois conseguiu melhorar a solução encontrada previamente em que eram necessários 5 postos, para uma nova solução onde apenas são necessários 3 postos.

Desta imagem é importante também observar o comportamento da meta-heurística para com o limite de tempo de precedência. Como se pode ver, os limites de precedência mantiveram-se os mesmos, sendo que a transferência de tarefas se adaptou o melhor possível a eles.

Outra conclusão importante a observar é que com a aplicação do segundo método foi possível obter uma ocupação média dos postos bastante superior ao observado após a aplicação da primeira heurística.

### 5.1.3 Capacidade da caixa

A capacidade total das caixas, como já foi referido, poderá influenciar a alocação das tarefas. Na figura 5.3 está ilustrada a solução obtida através da heurística *Kilbridge and Wester's Method*. Na figura 5.4 está presente o resultado após a aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search*.

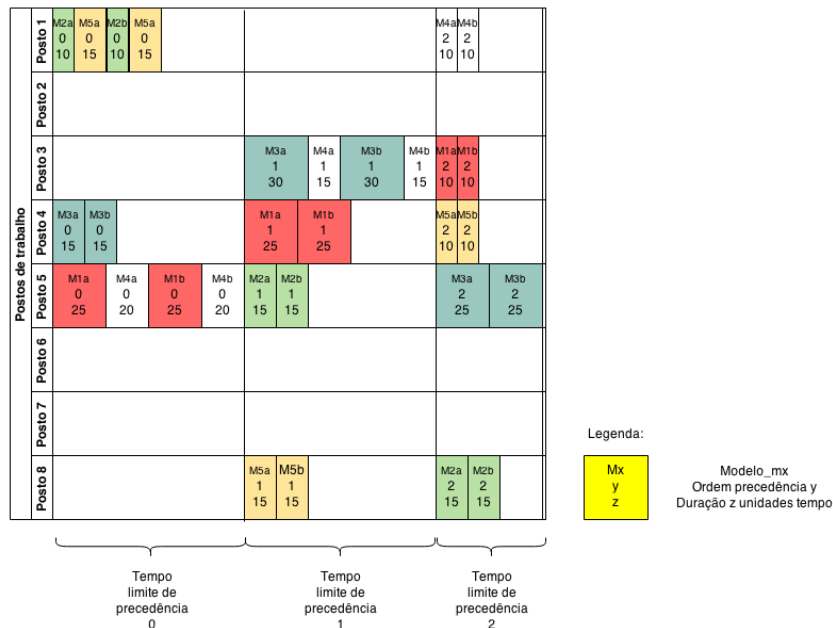


Figura 5.3: Resultado após aplicação da heurística KWM em caixas com capacidade de 5 pares

É observável que após a aplicação da heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada os resultados foram iguais aos do teste realizado para caixas com capacidade para 10 pares, o que faz sentido, visto que como não existe limitador de tempo para cada precedência as tarefas vão ser alocadas exatamente no posto que corresponde às necessidades mínimas das mesmas.

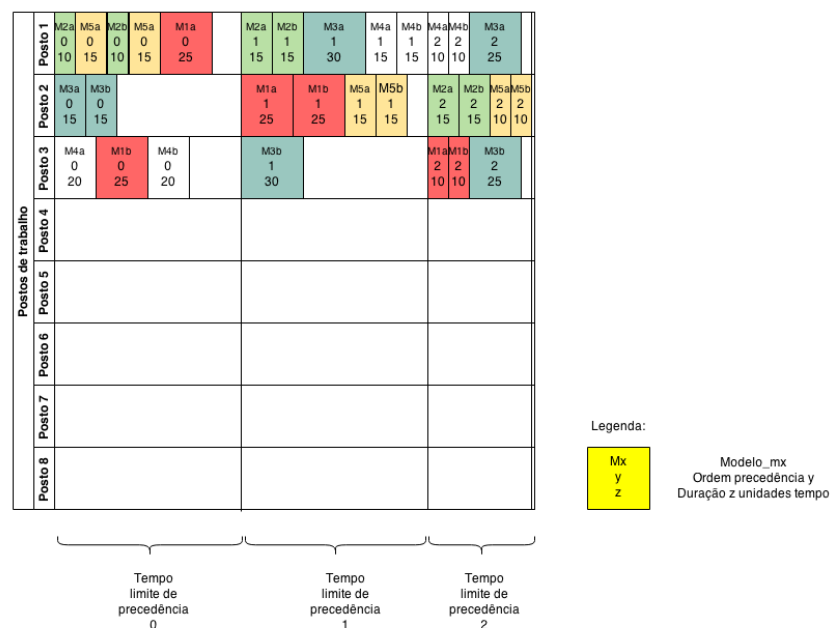


Figura 5.4: Resultado após aplicação da meta-heurística ILS em caixas com capacidade de 5 pares

Por sua vez, já depois da aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search* é necessário fazer algumas considerações. Apesar do número de postos obtidos ter sido igual ao resultado obtido com caixas de capacidade máxima 10, é importante observar que as tarefas não foram alocadas da mesma forma. Isso deve-se ao facto da existência do limite de precedência criado com o resultado da heurística *Kilbridge and Wester's Method*.

Na imagem 5.2 a última tarefa do modelo M3 não foi executada no posto 1, contudo, visto que agora essa produção foi dividida em duas partes, uma parte já vai poder ser alocada a este posto, tornando depois por sua vez a alocação da terceira tarefa do modelo M1 no posto 1 impossível ao contrário do que acontecia na primeira situação. Portanto, é importante referir que esta mudança se for aplicada em exemplos mais complexos poderá afetar em muito o resultado final.

## 5.2 Resultados computacionais

Nesta secção vão ser apresentados os resultados computacionais pela aplicação dos métodos *Kilbridge and Wester's Method* e *Iterated Local Search* utilizando dados disponíveis no momento. Esses dados, já adaptados ao problema em ficheiros de texto, encontram-se disponíveis na página dedicada ao projeto <http://andrefdfigueiroa.wix.com/dissertacao>, no separador "Documentos". Os testes foram realizados num computador Toshiba A300-244, com processador *Intel Centrino® 2, Core2 Duo P8700 2.53GHz* e 4GB (*DDR2-800MHz*) de memória RAM.

Estes resultados computacionais provêm da aplicação dos métodos descritos a cinco conjuntos de dados. Os primeiros quatro conjuntos são dados aproximados da realidade, sendo que entre eles variam o plano de produção, número e níveis de operadores. Para cada um desses conjuntos vão ser feitos três testes, o primeiro é uma aplicação direta dos métodos sobre os dados, no segundo são alteradas as capacidade das caixas, e por último é feita uma alteração ao nível dos operadores. No que diz respeito à capacidade das caixas, foram testadas três capacidades distintas: 10 pares, valor considerado pela fábrica como ideal, 5 pares e 15 pares. Estas variações são pequenas até pelas quantidades de produção dos testes, contudo variações maiores também acabariam por se tornar irreais, tanto pelo número de caixas que teria de circular na linha caso a capacidade fosse muito pequena, como pela perda de flexibilidade de alocação caso a capacidade fosse muito grande. Relativamente aos operadores, foi efetuado o mesmo teste, contudo foi simulado como se todos os operadores fossem de nível máximo, ou seja capazes de efetuar todas as tarefas. A ideia deste teste proveio do estudo realizado em [20], no qual era referido que se os operadores tiverem maior capacidade de produção, que será mais simples a alocação de tarefas, bem como o aproveitamento dos postos. Neste teste a meta-heurística *Iterated Local Search* não vai ser tida em conta, pois nunca vai ser possível encontrar um operador de nível superior aos que as tarefas já foram alocadas.

No último conjunto são utilizados os dados dos quatro primeiros conjuntos modificados de forma a apresentarem maior complexidade, complementando assim o seu estudo. As características e resultados dos testes aplicados são apresentados em 5.2.5.

Outro aspeto importante é o valor do limitador de tempo por precedência. Nomeadamente no teste

com o nível de operador máximo esse valor foi adaptado de forma a que a máxima percentagem de alocação possível fosse encontrada. Por outro lado, na variação da capacidade das caixas esse tempo limitador foi sempre mantido nos três casos, sendo que foi utilizado o valor encontrado que maximizava a produção para uma capacidade de 10 pares por caixa. Em alguns casos o limitador é igual ao tempo máximo disponível do posto, o que significa que não tem interferência na alocação das tarefas.

### 5.2.1 Conjunto 1

Na tabela 5.6 estão os resultados obtidos após a aplicação dos dois métodos para o primeiro conjunto de dados. Para além do número de postos utilizados, são analisados outros parâmetros, tais como a percentagem de alocação, a taxa média de ocupação dos postos em uso, bem como as ocupações máxima e mínima encontradas nesses postos.

Teste 1		
	KWM	ILS
Postos usados	8	8
Tarefas alocadas	84.6%	84.6%
Taxa média ocupação	71%	71%
Ocupação máxima	98.8%	98.5%
Ocupação mínima	43%	32.7%

Tabela 5.6: Teste 1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS

É possível observar que o número de postos de trabalho foi igual, ou seja a meta-heurística *Iterated Local Search* não foi capaz de reduzir o número de postos total. Contudo o seu efeito é visto na ocupação mínima, que embora não tenha sido suficiente para a redução de nenhum posto, a ocupação mínima foi reduzida. Isto acontece devido ao limitador de tempo por precedência imposto, pois ao fazer uma melhor distribuição das tarefas pelos postos, vai criar menos intervalos de tempo para que o método seja mais eficiente.

#### 5.2.1.1 Capacidade de caixas

Na tabela 5.7 são mostrados os resultados do teste 1 variando a capacidade total das caixas.

Os resultados obtidos são muito idênticos nos três casos. O aspeto mais relevante a assinalar é no valor de ocupação mínima. Esse valor após a aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search* terá tendência a descer, caso o número de postos se mantenha, contudo no caso das caixas de capacidade 15 até aumentou ligeiramente. Isso tem a ver com a maior dificuldade de fazer trocas de caixas de dimensões maiores, pois não há tanta flexibilidade.

Teste 1		Tempo limitador = 15500 segundos					
		Caixa=10		Caixa=5		Caixa=15	
		KWM	ILS	KWM	ILS	KWM	ILS
Postos usados		8	8	8	8	8	8
Taxa média ocupação		71%	71%	70.8%	70.8%	70.7%	70.7%
Ocupação máxima		98.8%	98.5%	99.5%	99.4%	97.7%	95%
Ocupação mínima		43%	32.7%	39.9%	31.1%	39.6%	39.9%
Tarefas alocadas		84.6%	84.6%	83.8%	83.8%	82.1%	82.1%

Tabela 5.7: Teste1 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas

### 5.2.1.2 Níveis de competências dos operadores

Uma das limitações encontradas deve-se às restrições dos níveis de operadores. Sendo assim foi testado o mesmo exemplo com todos os operadores de nível máximo, ou seja, capazes de executar todas as tarefas.

Teste 1		Nível original		Nível máximo
		KWM	ILS	-
Postos usados		8	8	12
Tarefas alocadas		84.6%	84.6%	90.5%
Taxa média ocupação		71%	71%	53.3%
Ocupação máxima		98.8%	98.5%	98.2%
Ocupação mínima		43%	32.7%	7%
Tempo limitador (s)		15500	-	11500

Tabela 5.8: Teste1 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores

Da tabela 5.8 é possível observar que de facto foi possível para o mesmo tempo de produção aumentar de 84.6% de tarefas alocadas, para 90.5%. Por outro lado foi necessário um maior número de postos para operar. De referir também que o limitador de tempo teve de ser adaptado para um valor mais baixo, pois como passaram a existir mais postos capazes de executar as diversas tarefas, estas podem ser executadas num tempo menor.

## 5.2.2 Conjunto 2

Na tabela 5.9 estão os resultados da aplicação dos métodos *Kilbridge and Wester's Method* e *Iterated Local Search* ao segundo conjunto de dados.

Tal como aconteceu no Teste 1, a meta-heurística não foi capaz de melhorar o resultado da primeira heurística. Neste exemplo também é notória a redução de percentagem de ocupação mínima, apesar de ainda não ser possível reduzir o número de postos.

Para além disso, convém referir que o limitador de tempo neste teste não foi usado, isto porque a produção estava distribuída de tal modo que a abordagem feita não é capaz de alocar todas as tarefas da primeira precedência.

Teste 2		
	KWM	ILS
Postos usados	8	8
Tarefas alocadas	74.8%	74.8%
Taxa média ocupação	74.6%	74.6%
Ocupação máxima	100%	100%
Ocupação mínima	7%	2.3%

Tabela 5.9: Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS

### 5.2.2.1 Capacidade de caixas

Na tabela 5.10 estão os resultados obtidos com a variação da capacidade das caixas.

Teste 2		Tempo limitador = 25800 segundos					
	Caixa=10		Caixa=5		Caixa=15		
	KWM	ILS	KWM	ILS	KWM	ILS	
Postos usados	8	8	8	7	8	7	
Taxa média ocupação	74.6%	74.6%	74.6%	85.3%	74.2%	84.8%	
Ocupação máxima	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Ocupação mínima	7%	2.3%	7%	34.3%	7%	34.9%	
Tarefas alocadas	74.8%	74.8%	74.7%	74.7%	75%	75%	

Tabela 5.10: Teste2 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas

De notar que tanto no caso da caixa de 5 pares como no de 15 foi possível reduzir um posto de trabalho, o que no caso da caixa de 15 pares foi um resultado algo surpreendente. É possível analisar que com essa redução do posto, tanto a ocupação mínima como a taxa média de ocupação aumentaram bastante, o que tem lógica.

### 5.2.2.2 Níveis de competências dos operadores

Na tabela 5.11 encontram-se os resultados obtidos no caso hipotético de todos os operadores serem de nível máximo.

Teste 2			
	Nível original		Nível máximo
	KWM	ILS	-
Postos usados	8	8	9
Tarefas alocadas	74.8%	74.8%	100%
Taxa média ocupação	74.6%	74.6%	81.6%
Ocupação máxima	100%	100%	99.6%
Ocupação mínima	7%	2.3%	14%
Tempo limitador (s)	25800	-	20000

Tabela 5.11: Teste2 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores

Visto existirem mais postos disponíveis para executar as diversas tarefas, foi ajustado o tempo limitador de precedência. Através desse ajuste foi possível observar que todas as tarefas foram alocadas com a utilização apenas de mais um posto, relativamente aos resultados com os operadores originais.

### 5.2.3 Conjunto 3

Na tabela 5.12 estão presentes os resultados do terceiro conjunto de testes.

Teste 3		
	KWM	ILS
Postos usados	13	13
Tarefas alocadas	79.7%	79.7%
Taxa média ocupação	50.7%	50.7%
Ocupação máxima	99.5%	99.5%
Ocupação mínima	5.1%	4.7%

Tabela 5.12: Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS

Após observação dos resultados, para alocar cerca de 80% das tarefas previstas foram necessários 13 postos de trabalho, ou seja, mais uma vez a meta-heurística não foi capaz de melhorar a solução. A taxa de ocupação média dos postos foi na ordem dos 50%, um valor algo baixo, mas que se justifica pela quantidade de postos utilizados para a percentagem de alocação alcançada.

#### 5.2.3.1 Capacidade de caixas

Na tabela 5.13 estão representados os resultados obtidos no teste 3 com variação da capacidade das caixas.

Teste 3			Tempo limitador = 24000 segundos			
	Caixa=10		Caixa=5		Caixa=15	
	KWM	ILS	KWM	ILS	KWM	ILS
Postos usados	13	13	9	8	9	8
Taxa média ocupação	50.7%	50.7%	65.9%	74%	65.5%	73.7%
Ocupação máxima	99.5%	99.5%	92.9%	92.9%	96.5%	96.5%
Ocupação mínima	5.1%	4.7%	2.8%	3.5%	2.8%	1.2%
Tarefas alocadas	79.7%	79.7%	68.5%	68.5%	66.9%	66.9%

Tabela 5.13: Teste3 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas

Neste exemplo aconteceu algo inesperado que foi o facto de para capacidades de 5 e 15 pares, a alocação das tarefas não correu pela melhor forma, conseguindo apenas alocar cerca de 67% em ambos os casos. Esta situação contudo criou maiores intervalos de tempos disponíveis nos postos, o que permitiu que a meta-heurística funcionasse com maior eficiência, reduzindo os postos de trabalho. Com a redução do número de postos usados foi alcançada uma maior taxa média de ocupação.

### 5.2.3.2 Níveis de competências dos operadores

Na tabela 5.14 está o resultado do conjunto de dados do teste 3, quando é utilizando um conjunto de operadores todos de nível máximo.

Teste 3

	Nível original		Nível máximo
	KWM	ILS	-
Postos usados	13	13	13
Tarefas alocadas	79.7%	79.7%	92%
Taxa média ocupação	50.7%	50.7%	55.7%
Ocupação máxima	99.5%	99.5%	96.5%
Ocupação mínima	5.1%	4.7%	18.6%
Tempo limitador (s)	24000	-	20800

Tabela 5.14: Teste3 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores

Tal como aconteceu nos testes anterior, aqui foi também necessário alterar o limitador de tempo de precedência de forma a maximizar a alocação de tarefas. Com isto, e mantendo o mesmo número de postos usados, foi possível aumentar a taxa de alocação de perto de 80% para cerca de 92%. Uma vez que o número de postos utilizados se manteve, e a percentagem de tarefas alocadas aumentou, a taxa média de ocupação também aumentou.

### 5.2.4 Conjunto 4

Os resultados do teste do último conjunto de dados estão mostrados na tabela 5.15.

Teste 4

	KWM	ILS
Postos usados	7	7
Tarefas alocadas	90.3%	90.3%
Taxa média ocupação	70.1%	70.1%
Ocupação máxima	100%	100%
Ocupação mínima	7.7%	0.7%

Tabela 5.15: Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS

Neste exemplo a meta-heurística mais uma vez não conseguiu melhorar a solução inicial. Foram então necessários 7 postos de trabalho para conseguir alocar cerca de 90% das tarefas previstas.

#### 5.2.4.1 Capacidade de caixas

Na tabela 5.16 estão presentes os resultados do teste quando se altera a capacidade máxima das caixas.



Teste 4		Tempo limitador = 25800 segundos					
	Caixa=10		Caixa=5		Caixa=15		
	KWM	ILS	KWM	ILS	KWM	ILS	
Postos usados	7	7	7	6	7	7	
Taxa média ocupação	70.1%	70.1%	70.1%	81.7%	70.1%	70.1%	
Ocupação máxima	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Ocupação mínima	7.7%	0.7%	7.7%	27.9%	7.7%	3%	
Tarefas alocadas	90.3%	90.3%	91.5%	91.5%	89.7%	89.7%	

Tabela 5.16: Teste4 - Resultados obtidos com variação da capacidade total das caixas

Dos resultados obtidos, é possível ver que a meta-heurística consegue melhorar a solução quando a capacidade máxima da caixa é 5. Isso dever-se-á ao facto de estas apresentarem maior flexibilidade comparativamente às outras. É também observável que para o tamanho de caixas igual a 10 quase foi reduzido um posto, sendo que para o caso da capacidade das caixas ser 15 já existiu maior dificuldade de transferir tarefas, daí a percentagem de ocupação mínima, apesar de ter diminuído, ser a que apresenta o valor mais alto. No caso das caixas de capacidade 5, é vista uma melhoria da taxa média de ocupação dos postos.

#### 5.2.4.2 Níveis de competências dos operadores

Na tabela 5.17 estão os resultado do teste 4, quando é tido em conta que todos os operadores são do nível máximo.

Teste 4			
	Nível original		Nível máximo
	KWM	ILS	-
Postos usados	7	7	7
Tarefas alocadas	90.3%	90.3%	98.3%
Taxa média ocupação	70.1%	70.1%	79.4%
Ocupação máxima	100%	100%	99.6%
Ocupação mínima	7.7%	0.7%	64.7%
Tempo limitador (s)	25800	-	20000

Tabela 5.17: Teste4 - Resultados obtidos com modificação do nível dos operadores

É visto que alterando o limitador de tempo de precedência que a taxa de alocação subiu de cerca de 90% para um pouco mais de 98%. De referir que não foi necessário novo posto para esse aumento de alocação, sendo que para tal foram melhor aproveitados os recursos existentes, como prova a taxa média de ocupação.

#### 5.2.5 Conjunto 5

Estes testes, como foi referido anteriormente, servem para complementar os testes computacionais realizados, através do aumento da dimensão dos dados usados.

Foram utilizados os mesmos conjuntos de dados usados anteriormente, contudo foram testadas duas variantes:

- na primeira todos os operadores foram duplicados, ficando uns com máquinas do tipo A, e os duplicados com máquinas de tipo B;
- no segundo caso as necessidades foram alteradas de forma a que todas as tarefas necessitassem apenas de um tipo de máquina.

Tanto numa situação como noutra, a principal diferença para os restantes testes computacionais já descritos ao longo da secção 5.2 é o aumento do número de soluções presentes na vizinhança utilizada pela meta-heurística *Iterated Local Search*.

Nestes testes as caixas tinham capacidade para transportar 10 pares de sapatos.

#### 5.2.5.1 Operadores duplicados

Nas tabelas seguintes são apresentados os resultados obtidos quando os operadores a utilizar na linha são duplicados.

Teste 1		
	KWM	ILS
Postos usados	13	11
Tarefas alocadas	90.5%	90.5%
Taxa média ocupação	49.1%	58%
Ocupação máxima	94.3%	97.3%
Ocupação mínima	5.3%	25.1%
Tempo limitador (s)	11500	-

Tabela 5.18: Teste1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores

Teste 2		
	KWM	ILS
Postos usados	14	11
Tarefas alocadas	100%	100%
Taxa média ocupação	52.4%	66.7%
Ocupação máxima	96.5%	98.4%
Ocupação mínima	7%	17%
Tempo limitador (s)	15800	-

Tabela 5.19: Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores

Teste 3

	KWM	ILS
Postos usados	21	17
Tarefas alocadas	98.7%	98.7%
Taxa média ocupação	36.4%	45%
Ocupação máxima	64%	88.8%
Ocupação mínima	2.33%	2.33%
Tempo limitador (s)	12300	-

Tabela 5.20: Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores

Teste 4

	KWM	ILS
Postos usados	11	10
Tarefas alocadas	100%	100%
Taxa média ocupação	51.3%	56.5%
Ocupação máxima	84.2%	88.7%
Ocupação mínima	15.6%	4.7%
Tempo limitador (s)	15000	-

Tabela 5.21: Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, duplicados os operadores

### 5.2.5.2 Restrição do tipo de máquina

Neste teste foram utilizados os operadores originais, contudo todas as estações de trabalho são compostas por máquinas do tipo A, bem como as tarefas podem todas ser executadas em máquinas do tipo A. Nas tabelas seguintes estão os resultados obtidos.

Teste 1

	KWM	ILS
Postos usados	12	11
Tarefas alocadas	90.5%	90.5%
Taxa média ocupação	53.2%	58%
Ocupação máxima	94.3%	98.4%
Ocupação mínima	5.3%	7.8%
Tempo limitador (s)	11500	-

Tabela 5.22: Teste1 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina

Teste 2

	KWM	ILS
Postos usados	12	10
Tarefas alocadas	100%	100%
Taxa média ocupação	61.2%	73.4%
Ocupação máxima	97%	98.3%
Ocupação mínima	18.6%	58.9%
Tempo limitador (s)	15800	-

Tabela 5.23: Teste2 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina

Teste 3

	KWM	ILS
Postos usados	13	12
Tarefas alocadas	95.2%	95.2%
Taxa média ocupação	57.2%	61.9%
Ocupação máxima	98.8%	98.3%
Ocupação mínima	15.3%	47.4%
Tempo limitador (s)	13000	-

Tabela 5.24: Teste3 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina

Teste 4

	KWM	ILS
Postos usados	11	9
Tarefas alocadas	100%	100%
Taxa média ocupação	51.3%	62.7%
Ocupação máxima	84.2%	88.6%
Ocupação mínima	10.5%	51.2%
Tempo limitador (s)	15000	-

Tabela 5.25: Teste4 - Resultados obtidos para métodos KWM e ILS, sem restrição do tipo de máquina

### 5.2.6 Resumo dos testes

Dos testes executados, é possível ver que a meta-heurística *Iterated Local Search*, para os casos da caixa de capacidade 10 unidades, não foi capaz de melhorar a solução. Isso deve-se principalmente ao facto de existir o limitador de tempo por precedência, que ao distribuir de uma forma mais equilibrada as tarefas, não vai permitir tantos intervalos de tempo vazios nos postos. De uma outra perspectiva, é possível ver que em casos onde a taxa de alocação é mais baixa a meta-heurística apresenta melhores resultados.

Quanto à variação entre caixas, a diferença em geral acabou por não ser grande. Isso deve-se ao facto de que essa variação apesar de tudo não é significativa para o tipo de produção envolvida

nos testes. Mesmo assim é possível ver que na maioria dos casos, a variação para caixas de menor capacidade acabou por apresentar a taxa de ocupação mínima mais baixa, o que significa que foi a que mais perto esteve de diminuir os postos necessários. Isso deve-se ao facto de que estas caixas por serem mais pequenas beneficiarem de uma maior agilidade para alocação, pois não exigem grandes blocos de tempo de uma só vez.

Por último, em relação ao nível de operadores utilizados na linha, é possível observar que a existência de operadores capazes de executar múltiplas tarefas facilitaram o processo de alocação, aumentando sempre a percentagem de tarefas alocadas, como tinha sido visto em [20].

Dos testes complementares, resultados apresentados em 5.2.5.1 e 5.2.5.2 é possível observar que com o aumento dos operadores disponíveis a meta-heurística *Iterated Local Search* apresentou melhorias face à heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada. Essa melhoria deve-se ao aumento de soluções admissíveis que vão pertencer à vizinhança que vai ser analisada.

### 5.3 Comparação de resultados

Na tabela 5.26 constam os resultados obtidos nesta dissertação e os obtidos pela equipa do INESC TEC com recurso aos seguintes processos:

- por aplicação da heurística *Ranked Positional Weights Method* (adaptada);
- por método exato, através do programa cplex.

Para os resultados do INESC TEC, foi permitido que o mesmo operador pudesse estar alocado a mais do que uma estação, o que não acontece na solução obtida neste estudo. Assim não será possível uma comparação perfeita.

	Projeto		RPW		Método exato	
	KWM	ILS	Nº Operadores	Nº Postos de trab.	Nº Operadores	Nº Postos de trab.
Teste1	8	8	9	11	8	9
Teste2	8	8	9	12	8	8
Teste3	13	13	10	12	7	7
Teste4	7	7	8	9	6	6

Tabela 5.26: Comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos

Dos resultados obtidos é possível ver que em três dos casos analisados, a combinação da heurística KWM com a meta-heurística ILS apresenta um número de postos utilizados menor em comparação com o método RPW. Contudo isso também só foi possível pois as tarefas planeadas não foram totalmente alocadas, ao contrário do que aconteceu com a heurística RPW.

Comparativamente à solução ótima, a combinação KWM+ILS também perde um pouco, agravando o facto de tal como no caso anterior, na solução ótima conseguiu-se alocar todas as tarefas. Comparando agora as heurísticas com os resultados ótimos, é possível observar que tanto a combinação KWM+ILS como a heurística RPW têm soluções piores. No entanto, visto que em casos

reais o número de postos e de sapatos a produzir pode ser muito maior, é de esperar que a obtenção de soluções exatas se torne cada vez mais difícil, sendo que a única hipótese é adotar uma heurística o mais eficiente possível.



## Capítulo 6

# Conclusões e trabalho futuro

Neste último capítulo encontram-se as conclusões do projeto. Na secção 6.1 comparam-se objetivos propostos com aqueles que foram conseguidos. Na secção 6.2 são feitas sugestões para trabalho futuro.

### 6.1 Satisfação dos objetivos

O principal objetivo deste projeto de dissertação prendia-se com o estudo duma nova linha de produção de calçado, de bastante complexidade, e com a proposta e o desenvolvimento de uma abordagem capaz de contribuir para o seu balanceamento. Por fim, o resultado dessa abordagem seria comparado com os resultados já obtidos pela equipa do INESC TEC.

Após analisado e compreendido o funcionamento da linha, foi decidido abordar o problema tratando a linha como sendo de produção misturada, *unpaced* e síncrona. Foi escolhida a heurística *Kilbridge and Wester's Method* para obter uma solução inicial do balanceamento. Esta heurística teve contudo de ser adaptada ao problema em causa. Em seguida foi aplicada a meta-heurística *Iterated Local Search* de forma a melhorar os resultados obtidos.

Do estudo desta abordagem foi possível tirar algumas conclusões. Por exemplo, a heurística *Kilbridge and Wester's Method* adaptada é que vai determinar o número máximo de postos a serem usados, bem como ditar as limitações para a aplicação da meta-heurística *Iterated Local Search*. Esta por sua vez não conseguiu fazer melhorias em nenhum dos casos em que a capacidade das caixas era a indicada como ideal, porém a utilização de métodos como este deve ser tida em conta, pois a implementação não é muito complexa e pode originar melhorias na solução final.

Foram também feitos testes para averiguar a melhor capacidade das caixas. Por um lado, as caixas que transportavam menos pares de sapatos eram mais facilmente transferidas, enquanto que as de maior capacidade notou-se que a transferência era mais complicada. Neste caso em particular, tendo em conta as vantagens e desvantagens de uns e outros, é possível concluir que a utilização das caixas de capacidade 10 pares é provavelmente a melhor, pois por um lado evita um grande número de caixas a circular pela linha, e por outro lado a produção de cada caixa não exige um período de tempo demasiado grande nos postos, facilitando a flexibilidade de alocação.



Um outro teste realizado consistiu na execução dos algoritmos supondo que todos os operadores disponíveis eram polivalentes podendo realizar qualquer tarefa. Foi possível observar o que foi referido na revisão bibliográfica, ou seja, que a alocação das tarefas foi facilitada, aumentando a taxa de alocação em todos os casos.

Ficou claro que quando se aumenta a dimensão dos problemas a meta-heurística *Iterated Local Search* oferece melhores resultados. Tal é expetável dado que quando existe uma vizinhança com um maior número de soluções possíveis a meta-heurística *Iterated Local Search* consegue mais facilmente encontrar uma melhor.

O estudo mais aprofundado da linha contudo teve algumas limitações resultantes de alguma falta de dados pois a linha estava em experiência ainda durante a execução do trabalho. Apesar disso e dos dados dos testes feitos não serem totalmente reais, já foi possível tirar algumas conclusões ao comparar as diversas abordagens. É de notar de que em nenhum caso as abordagens com heurísticas conseguiu alcançar o resultado ótimo obtido por métodos exatos. Numa comparação com a heurística utilizada pela equipa do INESC TEC, a *Ranked Positional Weights Method*, a abordagem deste estudo também apresentou resultados piores. Isso acontece devido ao tipo de prioridade atribuída às tarefas para sua alocação, pois enquanto que na heurística *Kilbridge and Wester's Method* a alocação é feita com base apenas na ordem de precedência, na heurística *Ranked Positional Weights Method* esse método para além da ordem no grafo de precedências entra com outros fatores para a ordem de alocação das tarefas.

## 6.2 Trabalho futuro

Quanto a trabalho futuro seria importante dispor de (mais) dados reais para poder realizar outros testes, de forma a melhor avaliar os métodos de balanceamento desenvolvidos. Também, e mais especificamente, sugere-se melhorar o simulador de forma a que este não esteja tão condicionado. Exemplo disso é tirar a condição de paragem que leva a que se uma tarefa não for alocada não possam ser alocadas tarefas de precedência superior, de modo a que continue a alocação dos modelos cujas tarefas foram todas alocadas. Contudo, visto que em testes mais básicos a heurística *Ranked Positional Weights Method* apresentou melhores resultados, é provável que essa situação se mantenha em situações mais complexas. Outra melhoria passará por incluir a possibilidade dos operadores trabalharem em diferentes turnos.

No caso mais geral, no que toca à abordagem em si, seria interessante interpretar o problema como uma linha assíncrona. Isso iria aumentar em muito a dificuldade tanto no desenvolvimento do simulador como na incorporação de uma meta-heurística, contudo tendo por base as limitações observadas ao longo deste projeto é provável que uma boa solução passe por esse tipo de abordagem.

Importante também será perceber até que ponto será proveitoso a utilização de uma meta-heurística

em casos como este, tendo em conta a complexidade de implementação da mesma com os possíveis resultados.

Por fim, foi visto durante o estudo do estado da arte deste género de problemas que o sequenciamento ajuda na obtenção de um melhor balanceamento, e por isso, no futuro pode ser uma boa adição a ter em conta, caso o tempo disponível o permita.



# Referências

- [1] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. Assembly line balancing: which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2):509–528, 2008.
- [2] Christian Becker e Armin Scholl. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, 168(3):694–715, 2006.
- [3] Maria Teresa Costa e José Soeiro Ferreira. A simulation analysis of sequencing rules in a flexible flowline. *European Journal of Operational Research*, 119(2):440–450, 1999.
- [4] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2):674–693, 2007.
- [5] Yeo Keun Kim, Jae Yun Kim, e Yeongho Kim. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence*, 13(3):247–258, 2000.
- [6] Armin Scholl e Christian Becker. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3):666–693, 2006.
- [7] Ana Maria Rodrigues. *Sectores e rotas na recolha de resíduos sólidos urbanos*. Tese de doutoramento, FEUP, 2014.
- [8] Marc HJ Romanycia e Francis Jeffrey Pelletier. What is a heuristic? *Computational Intelligence*, 1(1):47–58, 1985.
- [9] Gunther Zapfel, Michael Bogl, e Roland Braune. *Metaheuristic search concepts*. Springer, 2010.
- [10] Mahmut Kayar e Öykü Ceren Akyalçın. Applying different heuristic assembly line balancing methods in the apparel industry and their comparison. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 22(6):108, 2014.
- [11] SG Ponnambalam, P Aravindan, e G Mogileeswar Naidu. A comparative evaluation of assembly line balancing heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8):577–586, 1999.
- [12] Stefan Voß. Meta-heuristics: The state of the art. Em *Local Search for Planning and Scheduling*, páginas 1–23. Springer, 2001.
- [13] Christian Blum e Andrea Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(3):268–308, 2003.

- [14] coord. Cunha, Lúcio, coord. Takahashi, Ricardo, e coord. Antunes, Carlos Alberto Henggeler de Carvalho. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012 2012. doi:<http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0583-8>.
- [15] Helena R Lourenço, Olivier C Martin, e Thomas Stutzle. Iterated local search. *arXiv preprint math/0102188*, 2001.
- [16] Matthijs Den Besten, Thomas Stützle, e Marco Dorigo. Design of iterated local search algorithms. Em *Applications of Evolutionary Computing*, páginas 441–451. Springer, 2001.
- [17] Marc Pirlot. General local search methods. *European journal of operational research*, 92(3):493–511, 1996.
- [18] Pedro M Vilarinho e Ana Sofia Simaria. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40(6):1405–1420, 2002.
- [19] Wen-Chyuan Chiang, Timothy L Urban, e Xiaojing Xu. A bi-objective metaheuristic approach to unpaced synchronous production line-balancing problems. *International Journal of Production Research*, 50(1):293–306, 2012.
- [20] James C Chen, Chun-Chieh Chen, Ling-Huey Su, Han-Bin Wu, e Cheng-Ju Sun. Assembly line balancing in garment industry. *Expert Systems with Applications*, 39(11):10073–10081, 2012.
- [21] Armin Scholl e Stefan Voß. Simple assembly line balancing—heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2(3):217–244, 1997.
- [22] C Merengo, F Nava, e A Pozzetti. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37(12):2835–2860, 1999.